le Scienze

Ottobre 2019
euro 4,90

edizione italiana di Scientific American

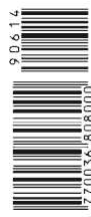
L'erede di LHC

I fisici stanno già progettando nuovi, giganteschi acceleratori per esplorare territori ignoti del mondo subatomico. Ma quale sarà davvero il futuro della fisica delle particelle?

POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003
CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB - ROMA
RIVISTA MENSILE - NUMERO 614 - 1 OTTOBRE 2019

Dossier Artico
La corsa per le risorse oltre il Circolo polare

Biologia
Modificare le cellule per sconfiggere i virus

Neuroscienze
Le reti cerebrali da cui emerge la coscienza

il più grande viaggio dell'arte mai raccontato

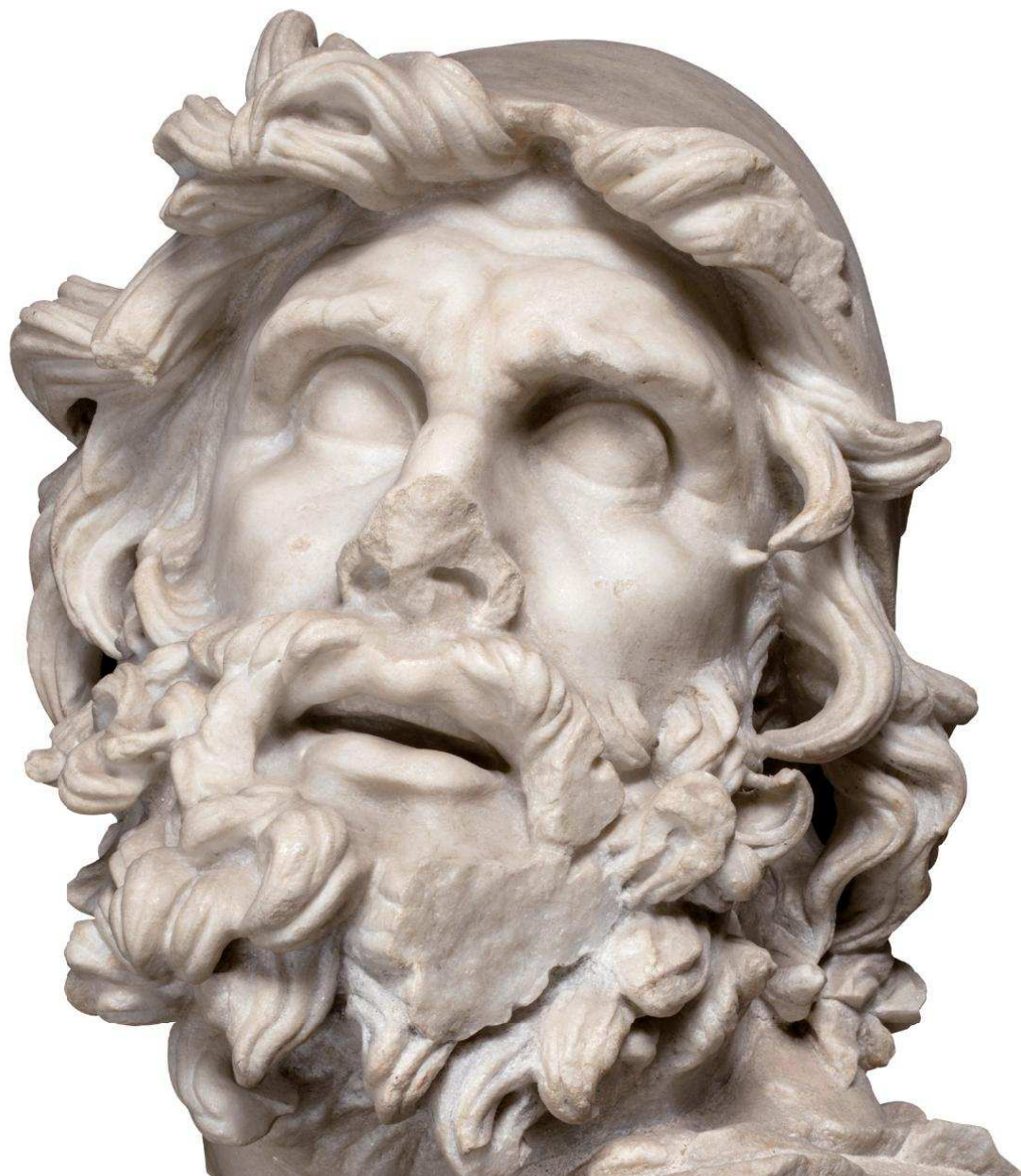
ULISSE
L'ARTE E IL MITO

Forlì, Musei San Domenico 15 febbraio - 21 giugno 2020

Informazioni 0543 19 12 030-031

Catalogo SilvanaEditoriale

in copertina

Sommario

FCC, un acceleratore ad anello di circa 100 chilometri, è un potenziale erede di LHC al CERN di Ginevra. Ma anche altri gruppi in altre parti del mondo progettano nuove, gigantesche macchine (Foto © *2019 CERN*)

ottobre 2019 numero 614

44

Alexander Ryumin/Getty Images

10

16

17

SCIENZA NEWS

Ton Koene/agefotostock/AGF (*vaccino*); cortesia Dale Omori/Cleveland Museum of Natural History (*cranio*); ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum), CC BY-SA 3.0 IGO (*Marte*)

havas
NUOVA PEUGEOT 508 SW
WHAT DRIVES YOU?
NUOVA 508 SW
NUOVO PEUGEOT i-Cockpit®
NIGHT VISION
ACTIVE SUSPENSION CONTROL
SCOPRI DI PIÙ SU PEUGEOT.IT
MOTION & e-MOTION
PEUGEOT

di Marco Cattaneo

Editoriale

Il futuro delle particelle elementari

Gli scienziati progettano nuovi giganteschi acceleratori. Ora la parola passa ai politici

Il 23 novembre saranno trascorsi dieci anni dalle prime collisioni tra i protoni che circolano nel grande anello del Large Hadron Collider del CERN, dopo la partenza falsa del 19 settembre 2008, quando un incidente causò una massiccia fuoriuscita di elio, il danneggiamento di alcuni magneti e la contaminazione dei tubi a vuoto. E ne sono passati già sette dal clamoroso annuncio della scoperta del bosone di Higgs, che portò gli esperimenti di Ginevra sui giornali di tutto il mondo.

Da allora in poi, solo qualche falso allarme, che ha destato nei fisici speranze svanite in un amen. A scanso di equivoci, non è che a LHC si sia battuta la fiacca, in questi anni. Si è approfondito lo studio del bosone di Higgs e dei suoi decadimenti, sono state scoperte nuove particelle nella cornice del modello standard, sono stati osservati stati esotici della materia come il pentaquark.

Purtroppo però, anche quando l'energia dell'acceleratore è stata portata a 13 TeV (teraelettronvolt), molto vicina al suo limite teorico, non si è trovata traccia di particelle che potrebbero far pensare a una nuova fisica. In altre parole, per il momento il sogno per nulla nascosto della comunità scientifica non si è avverato. Qual era? Beh, presto detto. La speranza era di trovare una traccia inattesa, magari di una particella ignota che potesse schiuderci uno spiraglio sulla misteriosa materia oscura che terrebbe insieme le galassie. E invece nulla.

In questo momento LHC è fermo per una pausa che durerà due anni, e riprenderà a raccogliere dati nel 2021. Poi, nel 2026, entrerà in funzione una sua versione «evoluta», ad alta luminosità, che produrrà un numero maggiore di collisioni alla massima energia. Ma la verità è che non abbiamo idea di dove si possano trovare, nello spettro delle energie, le tracce di nuova fisica che gli scienziati sperano di cogliere.

Così diversi gruppi internazionali sono già al lavoro per trovare l'erede di LHC. Tant'è che all'inizio di quest'anno il CERN ha presentato il progetto del Future Circular Collider. Come racconta Andrea Capocci a p. 28, si tratterà – o meglio si tratterebbe – di un collisore costruito in un nuovo tunnel lungo quasi 100 chilometri, sempre al confine tra Francia e Svizzera, che alla sua massima energia dovrebbe far scontrare protoni a 100 TeV, per un costo finale di circa 25 miliardi di euro. Ma a questa fase si dovrebbe arrivare solo intorno al 2065.

Ce ne sono altri di progetti ambiziosi, di cui ci parla sempre Andrea Capocci, ma fermiamoci qui. Perché al 2065 mancano 46 anni (anche se la versione per elettroni e positroni di FCC potrebbe entrare in funzione già nel 2040). Sono più dell'intera carriera lavorativa di uno scienziato. Mette i brividi l'idea di iniziare a progettare uno strumento che andrà a pieno regime tra due generazioni, perché soltanto la capacità di immaginazione dell'impresa scientifica può lavorare a progetti così a lungo termine: tu ci lavori oggi e a raccoglierne i risultati saranno i tuoi nipoti...

Ma c'è di più. Mette i brividi anche perché a finanziare FCC dovrà essere la politica. Che sempre più, anche in campo scientifico, scommette su progetti che promettono un ritorno a breve termine, almeno in visibilità. Diciamo una legislatura, per i più lungimiranti. E allora è naturale chiedersi quale sarà il futuro della fisica delle alte energie, se si dovranno conciliare esigenze così diverse. Chi avrà il coraggio di investire su progetti da cui non ha nulla da guadagnare?

Allegato a richiesta con «Le Scienze» di novembre *Alieni* di Jim Al-Khalili, un libro sulla ricerca di vita extraterrestre

Dove sono tutti quanti?

La nostra galassia, la Via Lattea, ospita centinaia di miliardi di stelle. Molte di queste stelle hanno propri sistemi planetari. Non ci sarebbe dunque motivo di credere che la vita sulla Terra sia qualcosa di unico. In altre parole, non ci sarebbe motivo di credere che siamo soli nell'universo. Eppure ancora non abbiamo ricevuto o rilevato alcun segno di vita intelligente da altri pianeti. E non certo per colpa nostra. Da quando abbiamo radio, televisione e telecomunicazioni via satellite, inondiamo lo spazio con le nostre trasmissioni. Ma nessun extraterrestre sembra interessato. Inoltre, da anni ormai progetti portati avanti in tutto il mondo cercano di catturare segnali extraterrestri. Ma per ora questa ricerca è stata vana. Dove sono, dunque, tutti quanti?

Agli extraterrestri e alla ricerca di forme di vita su altri mondi è dedicato *Alieni*, un libro a cura di Jim Al-Khalili, fisico teorico britannico e noto divulgatore, allegato a richiesta con «Le Scienze» di novembre. Per l'occasione, Al-Khalili ha messo in piedi un «Team Alieni», come lui stesso lo definisce, cioè un gruppo di scienziati e studiosi, leader mondiali nei rispettivi settori, che copriranno tutti gli aspetti dell'esistenza e della ricerca degli alieni.

I vari capitoli del libro hanno dunque declinazioni diverse. Dal nostro posto nell'universo, con una breve panoramica delle idee formulate sul tema nel corso della storia, alle prospettive future di un'eventuale nostra colonizzazione della galassia, dalle motivazioni che potrebbero avere gli extraterrestri a contattarci e visitarci (e lo farebbero in modo pacifico?) alla nostra ossessione per gli alieni e gli avvistamenti di UFO, il libro curato da Al-Khalili dà un quadro unico del nostro rapporto con ET. Per esempio, indagando pure su come l'intelligenza aliena potrebbe essere differente dalla nostra, e sulle teorie della cospirazione secondo cui gli alieni sono già entrati in contatto con noi. Senza tralasciare però questioni di base come la nascita della vita sulla Terra e una sua possibile replica su altri pianeti, e le tecniche con cui gli astronomi identificano e studiano mondi in orbita attorno a stelle lontane. La caccia continua. Il premio è la fine della nostra solitudine cosmica.

FUMETTI

Manga per diventare scienziati

Se siete appassionati di fumetti e di scienza, abbiamo una bella notizia per voi. Dal 4 ottobre in edicola potrete trovare *I manga delle scienze*, un'iniziativa di «Le Scienze» e «la Repubblica», in vendita a 9,90 euro in più oltre al prezzo della rivista o del giornale. La collana dei manga di scienza ha cadenza settimanale. Ognuno dei 12 volumi è accompagnato da pagine in cui non ci sono fumetti, ma dove si possono trovare test e spiegazioni testuali dei concetti illustrati che rendono ciascun manga un sostegno valido per i libri di testo destinati a scuole superiori e corsi introduttivi universitari.
E anche se non siete appassionati di pubblicazioni illustrate scommettiamo che questo viaggio nella scienza animato da fumetti in stile giapponese vi conquisterà.

PIANO DELL'OPERA

4 ottobre
Fisica

11 ottobre
Analisi matematica

18 ottobre
Relatività

25 ottobre
Biologia: DNA e genetica

1 novembre
Statistica

8 novembre
Astronomia

15 novembre
Database

22 novembre
Elettromagnetismo

29 novembre
Biochimica

6 dicembre
Matematica

13 dicembre
Regressione

20 dicembre
Anatomia

Tutta la scienza in formato digitale

Abbiamo una novità editoriale per i nostri lettori: *I quaderni de Le Scienze*. È una collana esclusivamente digitale, composta di numeri monografici che raccolgono alcuni dei migliori articoli, italiani e internazionali, pubblicati nell'edizione cartacea e in quella *on line* della rivista su un tema di attualità scientifica.

Fusione dei ghiacci e materia oscura sono gli argomenti dei primi due titoli pubblicati a settembre. Ogni volume è in formato PDF scaricabile e stampabile, di circa 30 pagine, e potrà essere acquistato tramite il nostro sito web a 2,99 euro in offerta promozionale di lancio. Le prossime uscite dei quaderni digitali avranno cadenza mensile. Dunque a ottobre e nei mesi successivi avremo altri temi da farvi esplorare. Dalla biologia alla paleoantropologia, dalle neuroscienze alla genetica alle tecnologie sviluppate grazie alla ricerca di base, cercheremo di darvi il quadro più completo possibile delle direzioni che sta prendendo la scienza. I singoli quaderni possono essere acquistati anche alla pagina:

https://www.lescienze.it/plus/edicola/collane.jsp

iStock; elaborazione Le Scienze (3)

Il lavoro di John T. Schiller ha portato allo sviluppo di vaccini per prevenire le infezioni da HPV, che possono causare tumori anche mortali

Come ho sconfitto il papilloma virus

È considerato un gigante della medicina perché ha segnato una svolta decisiva nella prevenzione del quarto tumore più comune nella popolazione femminile a livello mondiale: il carcinoma al collo dell'utero, che causa oltre 260.000 morti ogni anno. Quello di John T. Schiller, e del collega Douglas Lowy al National Cancer Institute, è stato un lavoro pionieristico che, partendo dallo studio della biologia di base del papilloma virus umano (HPV), ha portato allo sviluppo di vaccini per prevenirne le infezioni, che sono le più comuni trasmesse sessualmente. Una chiara dimostrazione che la ricerca di base non è un lusso ma un tassello fondamentale per raggiungere traguardi importanti a beneficio della salute pubblica. Schiller lo ha ricordato di recente a Trieste in occasione della cinquantesima edizione del congresso mondiale DNA Tumour Virus. «I risultati della ricerca di base sono il motore che guida la ricerca traslazionale e, infine, il miglioramento della salute umana. È fondamentale quindi garantire finanziamenti adeguati a un'ampia gamma di ricerche di base perché è impossibile prevedere quali scoperte si riveleranno fondamentali per i progressi della medicina».

Quali precedenti scoperte e progressi tecnologici sono stati fondamentali per il vostro lavoro sui vaccini per l'HPV?

Nel 2006, la Food and Drug Administration ha approvato il primo dei vaccini basati sulla nostra ricerca, il Gardasil. Dietro ci sono decenni di ricerca e la fortunata convergenza di due importanti risultati. L'evidenza che l'infezione da HPV è la causa principale del tumore alla cervice e lo sviluppo di tecnologie molecolari per la produzione di vaccini con particelle simili ai virus, *virus-like particle* (VLP) su cui si basano i tre vaccini contro il papilloma virus attualmente disponibili: Gardasil, Gardasil 9 e Cervarix.

Può spiegarci meglio?

Abbiamo scoperto che più copie della proteina L1 di HPV possono essere assemblate in particelle simili a virus ma non infettive perché non contengono materiale genomico virale. Sono però capaci di ingannare il sistema immunitario inducendo la produzione di grandi quantità di anticorpi per neutralizzare il virus in caso di successiva infezione. E questa scoperta ha aperto la strada allo sviluppo dei vaccini.

Quali benefici sono già evidenti?

Ci sono state evidenti riduzioni delle verruche genitali e delle lesioni cervicali precancerose nei paesi in cui i programmi di vaccinazione hanno raggiunto una copertura elevata. Cervarix è

un vaccino bivalente contro i ceppi virali HPV 16 e 18 responsabili del 70 per cento dei tumori del collo dell'utero. Gardasil 4 agisce anche contro HPV 6 e 11, essenzialmente non cancerogeni ma responsabili del 90 per cento dei condilomi genitali. E Gardasil 9 è un vaccino enavalente, che protegge anche da altri cinque tipi cancerogeni. La protezione è molto alta contro le nuove infezioni e le successive lesioni neoplastiche causate da questi ceppi virali, e conferisce una limitata cross-protezione verso altri tipi oncogeni di HPV. Ma i vaccini non agiscono in modo terapeutico, per questo è importante vaccinare prima dell'esposizione al virus.

Quindi prima di avere rapporti sessuali?

Sì. L'Organizzazione mondiale della Sanità raccomanda la vaccinazione alle ragazze di 9-14 anni basandosi sulla premessa che la maggior parte non ha ancora iniziato l'attività sessuale, quindi risponde meglio al vaccino e sono sufficienti due dosi anziché le tre raccomandate alle donne oltre quelle età. L'obiettivo principale è

Ton Koene/agefotostock/AGF; cortesia Schiller (*Schiller, foto nella pagina a fronte*)

di Simona Regina

CHI È

JOHN T. SCHILLER

Laureato in biologia molecolare all'Università del Wisconsin, e PhD in microbiologia all'Università di Washington, è *distinguished investigator* ai National Institutes of Health e direttore del Laboratorio di oncologia cellulare del National Cancer Institute (NCI). Nei suoi 30 anni all'NCI, ha studiato vari aspetti del papilloma virus e, insieme a Douglas Lowy, ha ideato test clinici dei vaccini per prevenire le infezioni da HPV. Ha ricevuto molti riconoscimenti, tra cui il Sabin Gold Medal Award, la National Medal of Technology and Innovation e il Premio per la ricerca clinica Lasker-DeBakey. Tra i suoi attuali interessi di ricerca, lo sviluppo di vaccini e terapie per altre malattie infettive e tumori.

Prevenire le infezioni. Campagna di vaccinazione contro l'HPV negli Stati Uniti destinata a giovani donne.

la vaccinazione delle ragazze perché il cancro del collo dell'utero rappresenta l'onere maggiore a livello mondiale delle infezioni da papilloma virus. Onere che si fa però meno asimmetrico in molti paesi ad alto reddito perché i programmi di screening riducono drasticamente le morti per cancro cervicale e perché c'è stato un aumento piuttosto grande del cancro orofaringeo indotto da HPV che in due terzi dei casi riguarda gli uomini.

La raccomandazione si estende quindi anche ai ragazzi perché i vaccini proteggono anche da questo tipo di tumore e dal cancro anale e del pene. Inoltre, estendendo la vaccinazione alla popolazione maschile, è stato osservato un aumento dell'immunità di gregge che contribuisce a proteggere le donne non vaccinate.

Il tumore al collo dell'utero uccide soprattutto nei paesi in via di sviluppo. Una maggiore diffusione dei vaccini potrebbe cambiare la situazione?

Sì, senza ombra di dubbio.

Che cosa fare allora per aumentare la copertura vaccinale?

La risposta varia in base al paese. In quelli in via di sviluppo, dove i vaccini sono stati resi disponibili tramite programmi nazionali di vaccinazione, l'adozione è stata quasi uniformemente eccellente. Il problema è l'accesso, perché i vaccini e le campagne di immunizzazione sono troppo costosi e a volte gli stock sono insufficienti. Ovviamente ridurre i costi dei vaccini, per esempio producendoli in paesi a medio reddito, sarebbe d'aiuto in contesti con risorse limitate. Ma anche una somministrazione monodose favorirebbe i tassi di copertura riducendo drasticamente i costi. Quindi stiamo effettuando studi clinici per verificare se una singola dose del vaccino sia sufficiente. E ci sono prove preliminari che confermano una protezione a lungo termine.

Sono in fase di sviluppo altri vaccini HPV?

Al momento sono in fase di sviluppo in India e in Cina vaccini VLP HPV generici. Il primo probabilmente sarà approvato per il mercato cinese prima della fine dell'anno.

È fiducioso rispetto allo sviluppo anche di altri vaccini antitumorali?

Per i vaccini profilattici, come i vaccini HPV, i bersagli più attraenti sono altri virus che causano tumori. Sono ottimista rispetto a un vaccino che protegga dal virus di Epstein-Barr (EBV). Inizialmente potrebbe essere messo in commercio per la prevenzione della mononucleosi infettiva, ma anche per prevenire i tumori indotti, come il linfoma e il carcinoma nasofaringeo.

Su quali fronti continua adesso la sua ricerca?

Stiamo lavorando allo sviluppo di vaccini per attivare il sistema immunitario contro proteine che mediano l'insorgenza di malattie croniche. L'idea è di sostituire le terapie con gli anticorpi monoclonali, molto efficaci ma molto costose dato che devono essere somministrate frequentemente, con vaccini che inducano una risposta di lunga durata. Attualmente stiamo prendendo di mira PCSK9, una proteina coinvolta nelle malattie cardiovascolari [regola la quantità di colesterolo nel sangue, NdR]. E abbiamo sviluppato un vaccino basato sullo stesso principio del vaccino anti-HPV, con particelle simili a virus che inducono anticorpi contro PCSK9. Ora siamo alla ricerca di un partner commerciale per portare il nostro lavoro nella clinica.

Freia Farmaceutici è un'azienda pioniera nello sviluppo di dispositivi medici, alimenti a fini medici speciali e integratori a base di canapa sativa

Della canapa non si butta via niente

Biscotti iperproteici per malati oncologici, creme ultra idratanti ed emollienti per le persone che soffrono di dermatite atopica, integratori capaci di abbassare il colesterolo. Tre prodotti molto diversi fra loro la cui efficacia però è data da uno stesso ingrediente, la canapa sativa (*Cannabis sativa*). Meglio, l'olio e la farina estratti dalla pianta. Parliamo ovviamente di una specie vegetale studiata appositamente per non contenere THC, la sostanza che può produrre effetti allucinogeni, ed essere invece ricca di sostanze attive che si possono sfruttare per migliorare la salute umana.

«Alcune varietà di canapa sono piante ricchissime di proprietà che, peraltro, i nostri nonni hanno da sempre sfruttato», racconta Alessandro Cavalieri, laureato in economia aziendale all'Università Bocconi di Milano e oggi amministratore delegato di Freia Farmaceutici, azienda italiana pioniera nello sviluppo di dispositivi medici, alimenti a fini medici speciali e integratori a base di canapa sativa. «Nel 2009 il Ministero della salute ha autorizzato prodotti anche alimentari per la salute umana a base di questa pianta purché priva di THC; da allora non abbiamo mai smesso di effettuare attività di ricerca e sviluppo e di sperimentazione clinica per individuare prodotti che potessero essere lanciati sul mercato farmaceutico», racconta Cavalieri.

rezkrr/iStock

Olio e farina

Da subito vengono individuati tre pilastri di ricerca e sviluppo: in ambito agronomico, per selezionare piante con caratteristiche particolari grazie all'ibridazione naturale, in modo da ottenere varietà non presenti in natura; nel campo dei processi di estrazione, per fare in modo che si riesca a ottenere il massimo quantitativo di sostanze e con metodi naturali; nella sperimentazione clinica, esplorando particolari aree terapeutiche. Tutto avviene in collaborazione con università, centri di ricerca e attori istituzionali che garantiscono la qualità del prodotto finale e la credibilità dei processi impiegati.

«Della pianta di canapa usiamo due sottoprodotti: olio e farina. L'olio è composto esclusivamente da acidi grassi polinsaturi, in particolare linoleico e alfalinoleico: due sostanze che l'organismo umano non è capace di produrre e che possono essere assunte solo dall'esterno», dice ancora Cavalieri. «E che nella pianta di canapa, a differenza di qualsiasi altro elemento in natura, sono presenti nel rapporto ottimale di 1 a 3, esattamente quello che il corpo umano riesce ad assorbire». Sostanze che entrano in tutti i meccanismi metabolici e che quindi sono essenziali per la vita.

Questi due acidi sono alla base dei prodotti che Freia ha sviluppato e portato sul mercato fino a oggi nel campo della dermatologia e delle malattie da alterazione del metabolismo. «In ambito dermatologico, si tratta di dispositivi medici a marchio CE: i *claim* che riportiamo, cioè, trovano conferma nei risultati degli studi clinici che abbiamo effettuato», va avanti Cavalieri. «Questo ci permette il mutuo riconoscimento in tutta Europa, dove possiamo quindi metterli in commercio. Siamo una delle due aziende europee che può farlo, l'altra è inglese».

Creme, gel e soluzioni sono il frutto della ricerca e della formulazione dell'azienda e sono pensate per diversi tipi di patologie: per i malati oncologici che si sono sottoposti a chirurgia, per prevenire la formazione di cheloidi; per quanti si sottopongono a radio o chemioterapia, per lenire i *rush* cutanei; per i pazienti in cura con cortisone, allo scopo di curare malattie infiammatorie della pelle, in modo da permettere lo stop della terapia cortisonica che se prolungata porta significativi effetti collaterali; per gli anziani, la cui pelle molto fragile è soggetta a fessurazioni e in caso di piaghe da decubito; per gestire la dermatite atopica e ricostituire

di Letizia Gabaglio

Prodotti di qualità. Freia Farmaceutici collabora con università, centri di ricerca e attori istituzionali che garantiscono qualità del prodotto finale e credibilità dei processi impiegati.

LA SCHEDA - FREIA FARMACEUTICI

Azienda fondata nel 2009

Persone di riferimento: Alessandro Guido Cavalieri Manasse (AD); Marco Santini (CFO)

Sito: http://www.freiafarmaceutici.it/ **Mail:** info@freiafarmaceutici.it

Numero di brevetti: 7

Dipendenti-collaboratori: 5 dipendenti e 43 collaboratori esterni

Cortesia Freia Farmaceutici

l'integrità della barriera cutanea. «In questo ultimo caso abbiamo sviluppato un crema ultraliquida ad azione antinfiammatoria che risponde alle linee guida internazionali per la gestione della dermatite atopica anche in età pediatrica», sottolinea Cavalieri.

Ma l'asso nella manica dell'azienda è l'integratore a base di olio di canapa che, a giudicare dagli studi effettuati finora, sembra poter diventare una valida alternativa all'impiego di statine nel ridurre il colesterolo LDL. La sperimentazione che lo ha evidenziato ha coinvolto 30 bambini affetti da ipercolesterolemia familiare, una condizione genetica che porta a livelli molto alti di colesterolo. Negli ultimi anni sono arrivati sul mercato farmaci mirati, che però non sono prescrivibili in età pediatrica; ma le statine, anche nei piccoli pazienti, possono avere effetti indesiderati particolarmente significativi. Lo studio effettuato da Freia in ambito pediatrico ha permesso ai pazienti che hanno assunto l'integratore a base di canapa di mantenere livelli di colesterolo adeguati.

«Su questo fronte andremo avanti con altre sperimentazioni, a cui si aggiungono gli studi pilota su integratori per il morbo di Chron, la sindrome dell'intestino irritabile e la sclerosi multipla», afferma Cavalieri.

L'ultimo, ma non per questo meno importante, campo di ricerca e sviluppo di Freia è quello dei prodotti iperproteici per la salute umana: la pianta di canapa è ricca di proteine vegetali – albumina ed edestina – quindi può essere usata senza limitazione nei pazienti oncologici e risulta molto utile per gli anziani che sono affetti da sarcopenia (la perdita di massa muscolare nel corso del processo di invecchiamento), da patologie croniche o debilitati da interventi chirurgici. «L'idea è produrre, sempre a partire dalla farina di canapa, una linea di alimenti gustosi, non percepiti come medicinali ma piuttosto come vero e proprio cibo con un miglioramento di adesione alla terapia o alla dieta prescritta», conclude Cavalieri. Il progetto di Freia ha convinto la Commissione europea che lo ha finanziato con 60.000 euro nell'ambito di un progetto più ampio, INCluSilver, inserito nei finanziamenti del programma di ricerca Horizon 2020. Perché della canapa, come del maiale, non si butta via nulla.

di Piergiorgio Odifreddi

professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e *visiting professor* alla Cornell University di Ithaca (New York)

I numeri di Thomas Mann

Nelle mani di un grande scrittore anche l'arida scienza diventa un romanzo

La sterminata opera *Giuseppe e i suoi fratelli* di Thomas Mann, premio Nobel per la letteratura nel 1929, riscrive in grande la storia abbozzata in piccolo dalla seconda metà della *Genesi*: cioè, le vicende del patriarca Giacobbe e dei suoi 12 figli. Nelle 2400 pagine dei quattro romanzi che compongono l'opera c'è anche spazio per qualche divagazione numerica, e l'occasione viene offerta dall'insegnamento impartito al giovane Giuseppe, quand'egli «impara il miracolo e il segreto del numero: il 60, il 12, il 7, il 4, il 3».

Tra astronomia e numerologia

Il significato di questi numeri derivava nell'antichità da un misto di astronomia e numerologia. Per esempio, sette erano i corpi celesti, divisi in due gruppi: da un lato, Sole e Luna; dall'altro, Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno. Dalla scomposizione $7 = 2 + 5$ deriva il ruolo fondamentale che il numero 5 viene ad assumere nel discorso di Mann: «Questo numero stava infatti in un bellissimo rapporto con il 12, in quanto $5 \times 12 = 60$, ma stava in un rapporto anche più bello con il 7, perché $5 + 7 = 12$. Ma era anche un numero tale che $5 \times 72 = 360$, dove il magnifico 360 rappresenta la somma dei giorni dell'anno e il quoziente della divisione dell'eclittica del Sole per la linea più lunga che si può tracciare sul suo disco».

L'ultima frase, un po' criptica, viene spiegata in questo brano, in cui i termini «grande eclittica» e «piccola eclittica» indicano rispettivamente l'orbita annuale apparente del Sole, di circa 360 giorni, e quella diurna agli equinozi, di circa 360 diametri solari apparenti (pari a circa mezzo grado): «12 erano le costellazioni dello Zoodiaco, ed esse formavano le stazioni della grande eclittica del Sole, percorsa in 12 mesi di 30 giorni ciascuno. Ma alla grande eclittica corrispondeva la piccola: se anch'essa veniva suddivisa in 12 parti, ciascuna risultava 60 volte più grande del disco solare. Il diametro del disco solare era infatti contenuto tante volte nell'orbita del Sole visibile agli equinozi quanti erano i giorni dell'anno, cioè 360, e in questi giorni la levata del Sole, dal momento in cui l'orlo superiore appariva all'orizzonte fino a quello in cui il disco era perfetto, durava la 60-esima parte di una doppia ora: cioè, due minuti».

La costellazione di Sirio

I rimanenti due numeri imparati da Giuseppe intervenivano poiché «i pianeti si potevano considerare anche come $7 = 3 + 4$, dove 3 era il numero degli astri che reggevano lo Zoodiaco: Sole, Luna e Ishtar (Venere). 4 invece era il numero dei punti cardinali, a cui corrispondevano le divisioni del giorno e le fasi della Luna e di Ishtar. Ma cosa si otteneva se si moltiplicavano questi numeri? Si otteneva $3 \times 4 = 12$ ».

Tutto questo era meraviglioso, ma non perfetto. Infatti, «affinché i 360 giorni pareggiassero l'anno solare, bisognava aggiungerne altri 5 alla fine: erano giorni cattivi e difficili, giorni di draghi e maledizioni, notturni giorni invernali, e allora il 5 assumeva una parte funesta. Ma molto cattivo era anche il 13, perché l'anno lunare aveva soltanto $12 \times 29{,}5 = 354$ giorni, e di tanto in tanto negli anni dovevano inserirsi dei mesi bisestili, che corrispondevano alla tredicesima costellazione dello Zoodiaco: il Corvo. E perfino il propizio 12 diventava infausto, perché $354 + 12 = 366$: cioè, era il numero grazie a cui si estendevano i giorni dell'anno lunare ai giorni dell'anno solare-lunare. Se invece si prendeva 365 come numero dei giorni, ne mancava pur sempre 1/4, e questa differenza cresceva tanto che nel corso $14600 = 365 \times 4$ di anni arrivava a formare un intero anno: era il ciclo della costellazione di Sirio».

Le divagazioni matematico-astronomiche inserite da Mann nell'opera su Giuseppe mostrano dunque come nelle mani di un grande scrittore anche l'apparentemente arida scienza possa diventare letteratura.

di Telmo Pievani

professore ordinario di filosofia delle scienze biologiche
dell'Università degli Studi di Padova

L'altra letteratura sul clima

Le più importanti penne del firmamento internazionale si occupano del cambiamento climatico nelle loro opere

Il riscaldamento climatico di origine antropica è diventato letteratura. Non nel senso che appartiene al mondo della fantasia, come pensano i sempre più sparuti negazionisti. Ma nel senso che ormai le più importanti penne del firmamento internazionale si stanno occupando di cambiamenti climatici.

Dopo Jonathan Franzen in *La fine della fine della Terra* (2019), in cui propone di dare priorità alla conservazione delle specie subito piuttosto che al clima di domani, l'ultimo in ordine di tempo è Jonathan Safran Foer, con *Possiamo salvare il mondo, prima di cena* (2019), volume ben scritto che ruota attorno a due tesi. La prima è che gli allevamenti intensivi rappresentano la principale minaccia ambientale e dunque ciascuno di noi potrebbe fare la sua parte modificando la dieta (niente carne e latticini prima di cena) per boicottarli. La seconda è che siamo incapaci di credere davvero di essere nei guai a causa della crisi ambientale. Come aveva argomentato anche Amitav Ghosh in *La grande cecità* (2017), abbiamo un problema di immaginazione.

Impegni consolatori

Contempliamo catastrofi al telegiornale, ma non sentiamo visceralmente di dover fare qualcosa, sostiene Safran Foer. Forse perché la Terra è sempre lì, una casa tutto attorno a noi, la diamo per scontata e dunque ci dimentichiamo dei suoi problemi, troppo vasti e complessi per essere capiti davvero. Del resto, abbiamo scoperto la Terra solo quando gli astronauti l'hanno vista da fuori, tutta intera, e l'hanno fotografata per noi. Una rivelazione di bellezza, solitudine, fragilità.

O forse i cambiamenti climatici fanno parte di quelle spiegazioni scientifiche che sono difficili da pensare per la mente. Che connessione può esserci tra il maggio freddo e piovoso di quest'anno in Italia e il riscaldamento globale? È controintuitivo. Come è possibile che un mio comportamento, qui e ora, faccia aumentare la velocità dei venti degli uragani o contribuisca all'alterazione delle correnti polari che causano gelo in Nord America e ondate di calore in Europa? Difficile crederci veramente e dunque agire di conseguenza facendo sacrifici. E allora cerchiamo sensazioni consolatorie di impegno, a scapito di rinunce.

Mobilitazione necessaria

La novità significativa è che oggi autori influenti come Safran Foer sposano una tesi evoluzionistica interessante. Siamo attratti da bisogni immediati e limitati, e dunque poco lungimiranti, a causa di un bagaglio evoluzionistico che ci portiamo dietro anche se è diventato controproducente, visto che il mondo attorno a noi, clima compreso, è cambiato troppo rapidamente rispetto ai tempi lenti dell'evoluzione. Quindi la crisi del pianeta si scontra con *bias* cognitivi innati, individuati dagli scienziati, che sono correlati con l'apatia e con l'incapacità di affrontare seriamente un problema così ampio e sfaccettato.

I libri di Ghosh e Safran Foer sono corredati da bibliografie scientifiche corpose e aggiornate. Ma loro stessi ammettono che fatti, numeri e *reportage* non bastano più. Nemmeno i romanzi distopici più intensi, come quelli di Margaret Atwood, di Maja Lunde con *La storia dell'acqua* (2018), preceduta in Italia dal coinvolgente *Qualcosa, là fuori* (2016) di Bruno Arpaia, sono sufficienti a smuovere le coscienze. Servono forse una mobilitazione di più linguaggi e poi un contagio sociale, affinché la crisi del pianeta susciti prima o poi le stesse passioni che molti continuano a coltivare per i diritti civili e per la giustizia sociale.

Quando il presidente democraticamente eletto del Brasile vara leggi che favoriscono la devastazione del più grande polmone del pianeta, capiamo che la questione non è brasiliana ma planetaria. E che in quel «democraticamente eletto» si nasconde un dilemma difficile da affrontare.

di Giorgio Manzi

ordinario di paleoantropologia alla Sapienza Università di Roma;
socio corrispondente dell'Accademia Nazionale dei Lincei

Il racconto di un cranio

Un fossile di milioni di anni fa rafforza l'idea di un cespuglio di creature bipedi alle origini della nostra evoluzione

Dalle parti di Lucy. I resti di MRD VP-1/1/1, come è stato catalogato il reperto di *A. anamensis* di circa 3,8 milioni di anni fa, sono stati scoperti in Etiopia, nella località di Miro Dora, ad appena 55 chilometri dal sito di Hadar dove nel 1974 venne scoperta Lucy, un *A. afarensis*.

Cortesia Dale Omori/Cleveland Museum of Natural History

Un cranio è pur sempre un cranio. Rispetto alle altre ossa dello scheletro, non c'è niente di più evocativo della morfologia e, vorrei dire, dell'identità di una creatura estinta; nulla di più nitido per le nostre interpretazioni di quanto emerge da quelle orbite vuote e dalla forma della faccia, delle mascelle, della scatola cranica e dei vari rilievi ossei. Come forse avrete intuito, vorrei tornare sulla scoperta del cranio di *Australopithecus* comparso su tutti i mezzi di comunicazione a fine agosto, dopo un paio di articoli pubblicati su «Nature».

È stato scoperto in Etiopia, nell'area di Woranso-Mille, a nord-ovest del corso del fiume Awash. È il cranio di un adulto, probabilmente maschio, datato a circa 3,8 milioni di anni dal presente. Identificato come *A. anamensis* sulla base delle caratteristiche di mascella, osso temporale e canini, è il rappresentante più recente della specie più antica di *Australopithecus*, in precedenza riferita all'intervallo compreso tra 4,2 milioni e 3,9 milioni di anni fa. *A. anamensis* è infatti la specie ancestrale ad *A. afarensis*, a cui appartiene la celebre Lucy, e successiva ad altri ominidi bipedi dei generi *Sahelanthropus*, *Orrorin* e *Ardipithecus*.

Fortuna e caso

L'identità di *A. anamensis* ne risulta straordinariamente arricchita, visto che era finora basata su una serie di reperti frammentari, distribuiti fra Etiopia e Kenya settentrionale: denti, porzioni di mandibole e mascelle, altre parti del cranio e ossa lunghe incomplete. La specie prende il nome proprio dai primi resti trovati in Kenya lungo le rive del lago Turkana, poiché la parola *anam* nella lingua delle popolazioni locali significa appunto «lago».

Ora finalmente un cranio; praticamente completo. La scoperta, avvenuta a febbraio 2016, come spesso accade in questi casi, è stata tanto fortunata quanto fortuita. La si deve a un pastore che, scavando per sistemare un recinto temporaneo alle sue capre, ha portato alla luce una porzione delle ossa mascellari. Nel frattempo, Yohannes Haile-Selassie – uno dei ricercatori africani che nell'ultimo mezzo secolo si sono formati alla scuola delle missioni estere, per lo più statunitensi – dirigeva scavi paleontologici a pochi chilometri di distanza e, avvertito del rinvenimento, è intervenuto sul sito e ha scoperto la restante parte del cranio.

Gould aveva ragione

Questo nuovo reperto ci dice cose che, almeno in parte, sapevamo già sulla base di resti molto più incompleti e frammentari, ma anche molto di più.

La sua descrizione mi ha fatto tornare in mente quello che una ventina d'anni fa raccontava un collega israeliano, Yoel Rak, appena tornato da Nairobi, dove aveva potuto esaminare i primi resti di *A. anamensis*: «Non ho mai visto niente di più prossimo – diceva Yoel – a quello che potrebbe essere stato l'antenato comune fra *Australopithecus* e le attuali scimmie antropomorfe». La ricostruzione 3D e le raffinate analisi morfometriche – realizzate qui in Italia da Stefano Benazzi e Antonino Vazzana – ci mostrano ora con chiarezza una sorta di «anello mancante» (con molte virgolette, beninteso) fra quello che precede e quello che segue il cranio di Woranso-Mille. Un dato che rafforza l'idea di un vero e proprio cespuglio di creature bipedi alle origini della nostra evoluzione.

Ci conferma anche che, ancora una volta, aveva ragione Stephen Jay Gould quando sosteneva che di solito le specie non evolvono susseguendosi le une con le altre, in base alla modalità chiamata anagenesi, ma piuttosto per rapide scissioni (cladogenesi), a cui la specie-madre sopravvive per qualche tempo. Infatti, il cranio di *A. anamensis* è almeno 100.000 anni più recente dei più antichi rappresentanti della specie-figlia *A. afarensis*.

di Amedeo Balbi

professore associato di astronomia e astrofisica
al Dipartimento di fisica dell'Università di Roma Tor Vergata

Bombe atomiche sul Pianeta Rosso?

I dati disponibili mostrano che la proposta di Elon Musk di terraformare Marte con testate nucleari non ha senso

C'è una idea dura a morire nei sogni di chi immagina una futura colonizzazione di Marte da parte della nostra specie: quella di «terraformare» il pianeta, ossia di rendere l'ambiente di Marte adatto alla presenza umana non con la costruzione di habitat artificiali, ma con opere di ingegneria planetaria che ne alterino atmosfera e clima. È un'idea che risale almeno agli anni settanta del secolo scorso, e che ha conosciuto nel tempo diverse incarnazioni, dalle più serie alle più fantasiose. L'ultima, in ordine di tempo, è quella rilanciata ad agosto via Twitter dal miliardario e imprenditore spaziale Elon Musk (dei suoi piani di colonizzazione marziana ho già parlato in passato su questa rubrica): e cioè bombardare con testate nucleari le calotte polari del pianeta, per riscaldarle e liberare l'anidride carbonica intrappolata nel ghiaccio. Questo, secondo Musk, dovrebbe aumentare la pressione atmosferica e l'effetto serra, innalzando la temperatura di Marte e rendendola più simile a quella terrestre.

Un problema assai complesso

Il piano – se così possiamo definirlo – di Musk è quantomeno incauto, e certamente non è molto sensato pensare di cambiare il clima di un pianeta a suon di bombe atomiche. Tuttavia, l'idea di aumentare la concentrazione atmosferica di anidride carbonica di Marte per mitigarne la temperatura è stata presa in seria considerazione dalla comunità scientifica. Uno dei riferimenti più citati, in proposito, è uno studio di Christopher P. McKay, Owen B. Toon e James F. Kasting, intitolato *Making Mars habitable* e pubblicato su «Nature» nel 1991. Lo studio sottolinea l'enorme complessità del problema, che dipende da molti fattori fisici e geologici poco noti, e non giunge a conclusioni definitive. Secondo McKay e colleghi, dotare Marte di un'atmosfera ricca di ossigeno e innalzare la temperatura fino a valori terrestri sarebbe, oltre che incredibilmente complicato dal punto di vista pratico, molto probabilmente impossibile anche in linea di principio, date le condizioni del pianeta.

Diverso il discorso per una terraformazione «debole», ovvero per la produzione di un'atmosfera più densa e ricca in anidride carbonica, che permetterebbe ad alcune piante di sopravvivere e agli esseri umani di camminare sul pianeta dotati solo di un respiratore artificiale. Tuttavia, anche questa possibilità dipende in modo cruciale dalla quantità di anidride carbonica tuttora presente su Marte.

Impossibile per ora

Ed è qui che arriva la doccia fredda sugli entusiasmi di Musk e degli altri proponenti della terraformazione del Pianeta Rosso. Uno studio di Bruce M. Jakosky e Christopher S. Edwards, intitolato *Inventory of CO_2 available for terraforming Mars*, e pubblicato lo scorso anno su «Nature Astronomy», conclude che anche una terraformazione debole di Marte sarebbe impossibile con le tecnologie attuali. Secondo Jakosky e Edwards, i dati più recenti registrati dalle sonde marziane mostrano che tutta l'anidride carbonica intrappolata nel suolo e nel ghiaccio di Marte, anche se immessa interamente nell'atmosfera, non basterebbe a innalzare la temperatura ai livelli terrestri.

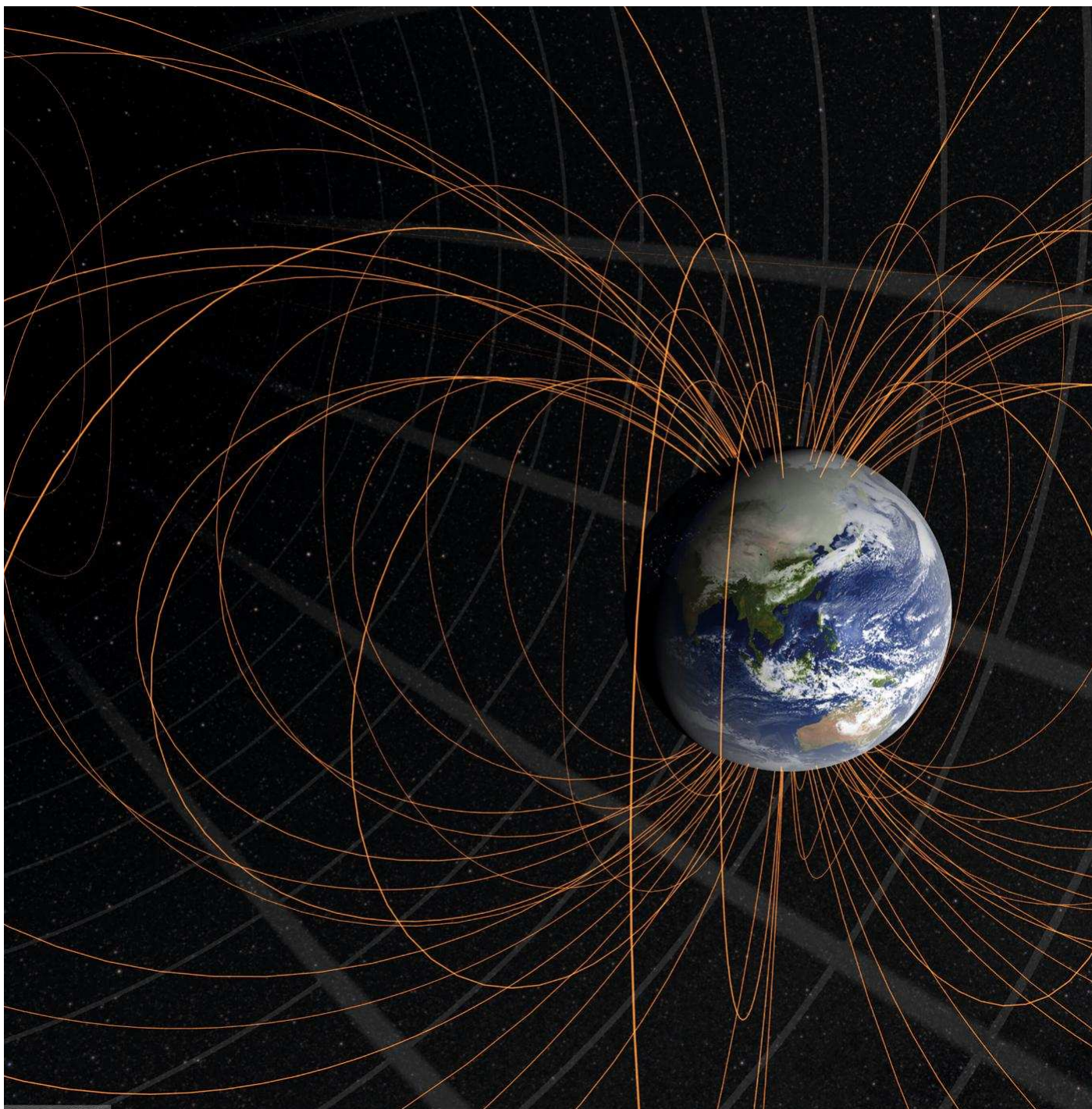
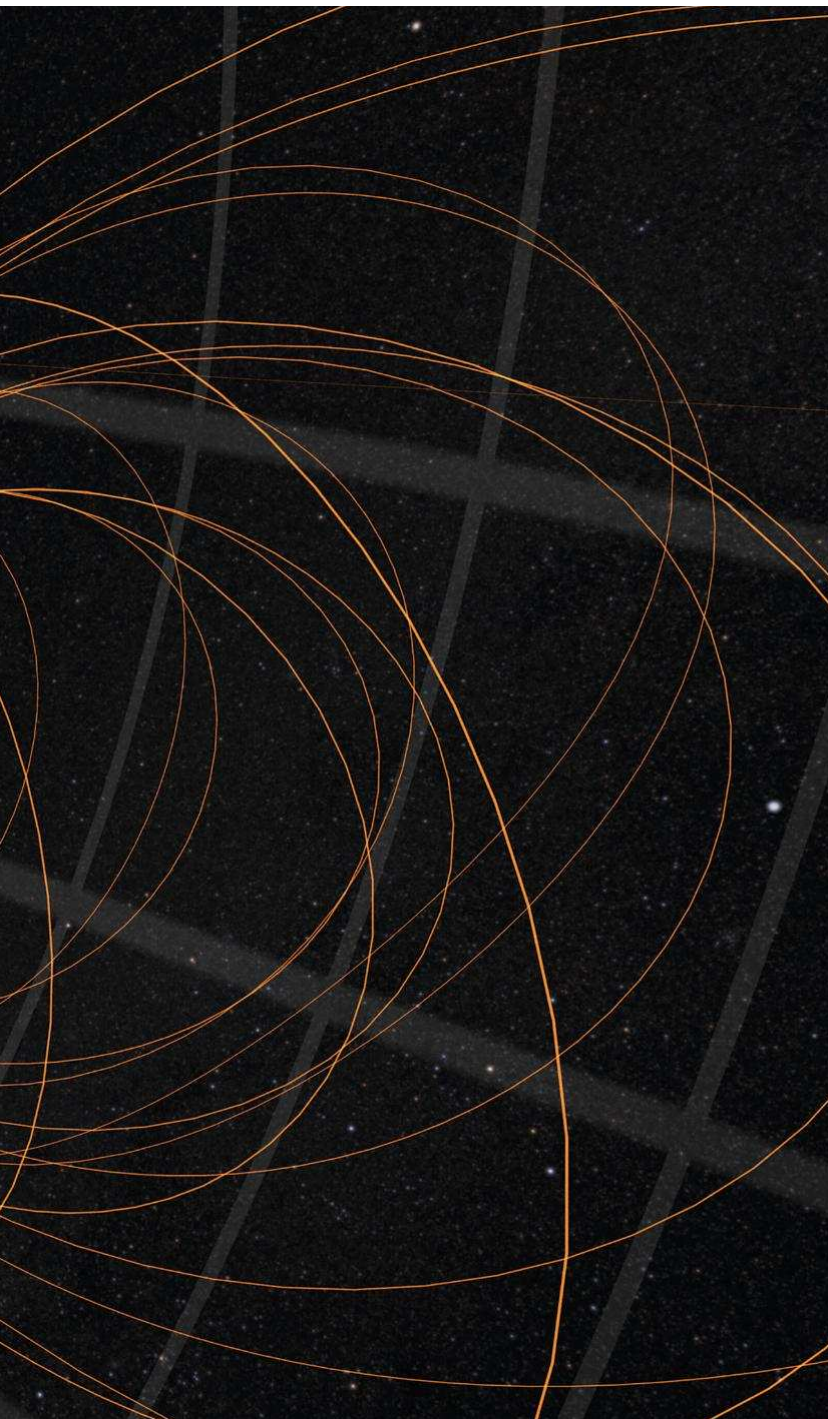
C'è sempre la possibilità che queste stime siano pessimistiche, e che su Marte ci sia molta CO_2 ben nascosta e sfuggita alle osservazioni. Ma anche se fosse, le enormi difficoltà tecniche e i costi astronomici della terraformazione marziana dovrebbero suggerire parecchio scetticismo sulla possibilità che scenari del genere siano realizzabili. Senza contare gli interrogativi etici connessi a un cambiamento climatico indotto artificialmente su un altro pianeta (che, ricordiamolo, potrebbe in teoria ospitare forme di vita microscopiche), se non bastasse quello che, involontariamente, abbiamo già prodotto sul nostro. Se anche potessimo, siamo sicuri che dovremmo farlo?

Nel mirino. Promethei Planum è una regione vicina al Polo Sud marziano ricca di ghiaccio e anidride carbonica. La CO_2 intrappolata nel ghiaccio di Marte potrebbe essere liberata in atmosfera, per esempio con esplosioni nucleari, per innescare un effetto serra simile a quello terrestre.

GEOFISICA

Il lungo balletto dei poli della Terra

L’ultima inversione del campo geomagnetico è stata lunga e complessa

NASA's Scientific Visualization Studio/JPL NAIF/AGF

Uno schermo della vita.
Illustrazione della magnetosfera terrestre, con le linee del campo che emergono dai due poli. L'azione di schermo del campo magnetico rispetto ai raggi cosmici, tra l'altro, rende possibile la vita sulla Terra.

Barriera protettiva contro i raggi cosmici, riferimento per le bussole, origine delle aurore polari: onnipresente eppure impalpabile, il campo magnetico della Terra rimane un fenomeno ancora poco compreso. Lo studio della sua origine, come anche delle variazioni di intensità e dello spostamento dei suoi poli, hanno appassionato generazioni di ricercatori. Tra le poche certezze, c'è quella delle sue periodiche inversioni. Durante la più recente, avvenuta circa 780.000 anni fa e chiamata Matuyama-Brunhes, in poche migliaia di anni i due poli magnetici si scambiarono la rispettiva posizione, inaugurando l'attuale epoca a polarità normale. Una ricerca coordinata da Brad Singer, professore di geocronologia dell'Università del Wisconsin a Madison, e pubblicata su «Science Advances», getta nuova luce su questo evento, suggerendo un'evoluzione ben più complessa e durevole rispetto a quanto ipotizzato finora.

A distanza di migliaia di anni, rocce e sedimenti conservano intensità e direzione caratteristiche del campo magnetico durante la loro epoca di formazione. Gli autori hanno combinato i dati provenienti da studi precedenti effettuati sui sedimenti marini, che garantiscono una successione di misurazioni continua nel tempo, con l'analisi dell'elemento chimico berillio di alcune carote antartiche. L'abbondanza di un suo isotopo instabile, formato nello scontro tra raggi cosmici e atmosfera, riflette l'intensità del campo magnetico. Le due serie di dati sono state integrate con analisi dei minerali ferrosi contenuti in colate laviche.

«Le colate di lava rappresentano la testimonianza ideale dell'attività del campo magnetico. Tuttavia, possono fornire solo misurazioni puntuali: nessuna eruzione è continua nel tempo», ha spiegato Singer. I ricercatori hanno perciò selezionato sette colate, tra Tahiti, Hawaii, Cile, Guadalupa e Canarie, in modo da coprire un intervallo di circa 70.000 anni a cavallo dell'inversione Matuyama-Brunhes. La misurazione delle abbondanze relative degli atomi di un isotopo stabile del potassio, il potassio-40, e di argon nei campioni ha restituito l'età di solidificazione della lava. E dunque la possibilità di datare con grande precisione le variazioni del campo magnetico. I risultati hanno svelato che esso iniziò a indebolirsi circa 795.000 anni fa. Le fluttuazioni di intensità proseguirono per almeno 18.000 anni durante i quali due brevi inversioni parziali anticiparono quella completa. Quest'ultima fu, in termini geologici, relativamente repentina, impiegando meno di 4000 anni per concludersi. Lo studio non si limita ad arricchire le nostre conoscenze del passato ma rappresenta anche una finestra sul futuro: da quando l'umanità ha iniziato a misurare l'intensità del campo magnetico, essa è diminuita di quasi il cinque per cento ogni secolo.

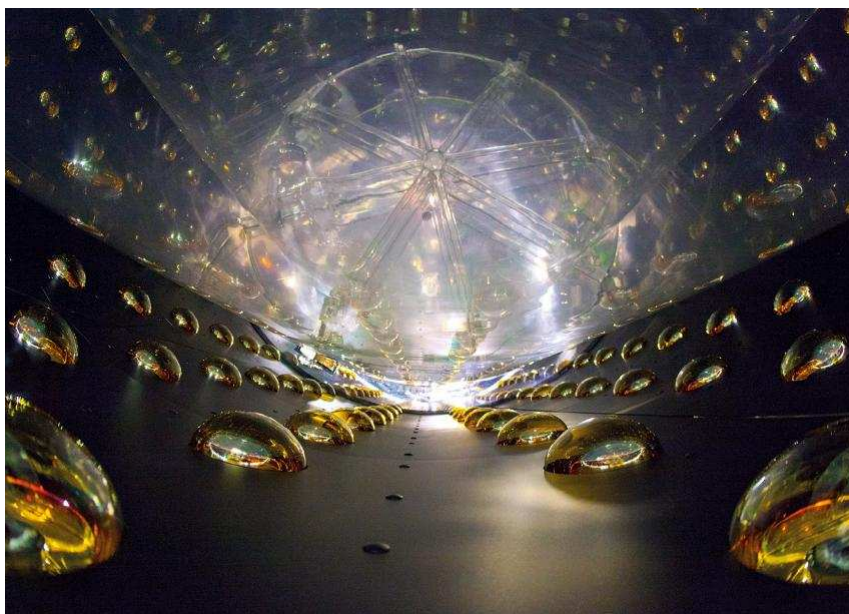
Davide Michielin

FISICA DELLE PARTICELLE

Un nuovo valore per il neutrino

Calcolato il limite superiore per la massa del più leggero dei tre tipi di neutrini

Scoprire quanto vale la massa dei neutrini non è un'operazione semplice. Anche perché, a differenza delle altre particelle elementari, interagiscono debolmente con la materia, hanno una massa molto piccola, e, soprattutto mostrano la caratteristica nota come «oscillazione del sapore». I neutrini si presentano in tre tipi diversi, o sapori, chiamati rispettivamente elettronico, muonico e tauonico. Ognuno di questi sapori è il risultato di una sovrapposizione quantistica di tre diversi stati di massa. Propagandosi nello spazio, il livello di sovrapposizione fra questi tre stati può cambiare, producendo così un neutrino di sapore diverso da quello di partenza. Quindi, quando si cerca di misurare la massa del neutrino, non si tratta di valutare, per esempio, la massa del neutrino elettronico, ma di determinare la massa di ciascuno dei tre diversi stati (leggero, medio, pesante), le cui sovrapposizioni danno origine ai diversi sapori.

Ora, un gruppo di ricercatori guidato da Arthur Loureiro, dello University College di Londra, ha calcolato il limite superiore della massa dello stato più leggero. Il risultato è pari a 0,086 elettronvolt (eV). Per confronto, la massa dell'elettrone è pari a 0,511 megaelettronvolt (MeV), quasi sei milioni di volte più grande. Come descritto nello studio pubblicato su «Physical Review Letters», gli autori hanno ottenuto questo valore grazie all'impiego di supercomputer e a un vasto insieme di dati proveniente sia da osservazioni astrofisiche e cosmologiche sia da esperimenti con acceleratori di particelle.

Fissando le condizioni al contorno imposte dalle misure reali, Loureiro e collaboratori hanno elaborato nove diversi modelli, ciascuno con masse dei neutrini diversi, trovando che il valore di 0,086 eV è quello che si adatta meglio ai dati sperimentali.

Emiliano Ricci

Teletrasporto più efficiente con i qutrit

Il teletrasporto quantistico comincia a fare sul serio. Un gruppo di ricerca guidato da Jian-Wei Pan dell'Università della scienza e della tecnologia della Cina e Anton Zeilinger dell'Università di Vienna ha realizzato per la prima volta il teletrasporto di un cosiddetto *qutrit*, ovvero un'unità di informazione quantistica a tre livelli, in grado di trasportare una maggiore quantità di informazione rispetto al più semplice *qubit*.
I risultati sono stati pubblicati sulle «Physical Review Letters».
La possibilità di teletrasportare stati quantistici è resa possibile dal fenomeno dell'*entanglement*, una forte correlazione a distanza che si può sviluppare tra due sistemi quantistici (per esempio tra due fotoni, i quanti di luce). Tuttavia, finora era stato possibile trasferire unicamente i qubit, le unità di informazione quantistica più semplici. Analogamente ai bit dell'informatica classica, i qubit sono stati a due livelli, ma mentre i bit possono assumere solo uno dei due valori permessi (0 o 1), il qubit può assumerli entrambi nello stesso momento, in uno stato sovrapposto (0 e 1). Questa capacità è una diretta conseguenza delle leggi della meccanica quantistica.
Con i qutrit le cose diventano molto più complesse, perché essi devono realizzare la sovrapposizione di tre livelli, anziché due. Per riuscire a ottenere e trasportare un qutrit, Pan e colleghi hanno condiviso una coppia di fotoni *entangled* tra una «stazione» trasmittente e una ricevente, vincolando ciascun fotone a potersi muovere tra le due stazioni seguendo tre possibili percorsi: la sovrapposizione tra questi tre cammini ha quindi prodotto il qutrit.
Il passaggio dal teletrasporto dei qubit a quello dei qutrit aumenta la quantità di informazione trasferibile e anche la resistenza al rumore, con ovvi vantaggi per l'efficienza delle comunicazioni quantistiche: si tratta di una tappa importante verso l'obiettivo di riuscire a teletrasportare lo stato quantistico completo di una particella, composto da un numero arbitrariamente alto di livelli sovrapposti.

Matteo Serra

Cortesia Roy Kaltschmidt, Lawrence Berkeley National Laboratory/Wikimedia Commons

ASTRONOMIA

Miliardi di Terre nella nostra galassia

Stimato il numero di pianeti simili al nostro che possono trovarsi nella Via Lattea

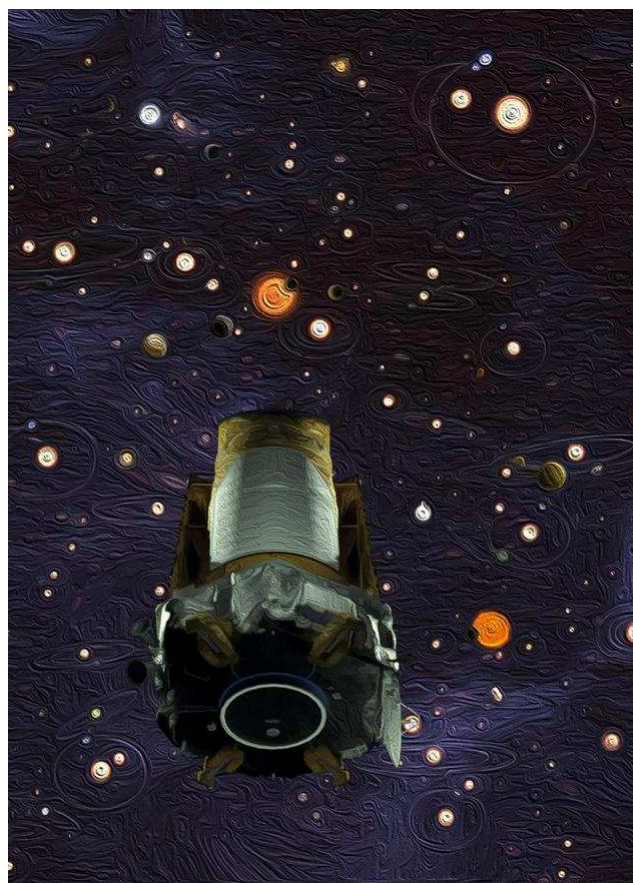
Nella Via Lattea potrebbero esserci fino a dieci miliardi di mondi simili alla Terra. La stima, pubblicata su «The Astronomical Journal» dal gruppo di ricercatori dell'Università della Pennsylvania coordinato dall'astrofisico Eric Ford, è basata sui dati di un cacciatore di pianeti extrasolari, il telescopio spaziale Kepler della NASA, in pensione dall'ottobre del 2018.

Secondo i calcoli effettuati dagli autori, nella nostra galassia una stella simile al Sole ogni quattro potrebbe accogliere un pianeta con caratteristiche analoghe alla Terra. Si tratta, cioè, di mondi con un clima abbastanza temperato da avere acqua allo stato liquido in superficie. Pianeti che quindi potrebbero trovarsi nella cosiddetta zona di abitabilità: quell'invisibile regione di spazio in cui un pianeta è alla giusta distanza dalla propria stella madre da riuscire ad avere acqua allo stato liquido. Condizione fondamentale per lo sviluppo di forme di vita, come le conosciamo oggi sulla Terra.

Negli ultimi anni si è fatta sempre più numerosa la popolazione di pianeti esterni al sistema solare scoperti dagli scienziati: sono ormai più di 4000. Nella maggior parte dei casi si tratta di giganti gassosi, più grandi di Giove e inospitali per la vita. Ma molti sono pianeti di tipo roccioso, e potrebbero avere un'atmosfera.

Ora si apre la caccia ai possibili sosia della Terra sparsi nella Via Lattea. Un importante contributo lo darà nei prossimi anni il telescopio spaziale James Webb, nato da una collaborazione tra NASA e le agenzie spaziali europea (ESA), e canadese (CSA) e considerato l'erede del celebre telescopio spaziale Hubble. L'assemblaggio del James Webb è stato completato nelle scorse settimane e il suo lancio è in programma nella primavera 2021 con il razzo Ariane 5 dalla base europea di Kourou, nella Guyana francese.

Davide Patitucci

Cortesia NASA

Un gravitino massiccio per la materia oscura

Finora la caccia alle particelle che compongono la materia oscura è stata infruttuosa. Forse perché si è sbagliato l'approccio, cercando particelle relativamente leggere, debolmente interagenti con la materia ordinaria ed elettricamente neutre. Ora uno studio pubblicato su «Physical Review Letters» da Krzysztof Meissner, dell'Università di Varsavia, e Hermann Nicolai, del Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik di Potsdam, propone una soluzione diversa. Secondo i due ricercatori, la materia oscura potrebbe non essere costituita da un numero elevatissimo di particelle neutre e relativamente leggere, ma da poche particelle molto massicce e dotate di carica elettrica: i gravitini supermassicci. A differenza di assioni e WIMP (*weakly interacting massive particles*), i candidati più gettonati per la materia oscura, i gravitini supermassicci sarebbero estremamente pesanti, con una massa pari alla «massa di Planck», corrispondente a 21,76 microgrammi. Per confronto, il protone ha una massa dieci miliardi di miliardi di volte più piccola. Con una massa simile, sarebbe sufficiente un gravitino ogni 10.000 chilometri cubi per rendere conto di tutta la materia oscura dell'universo.

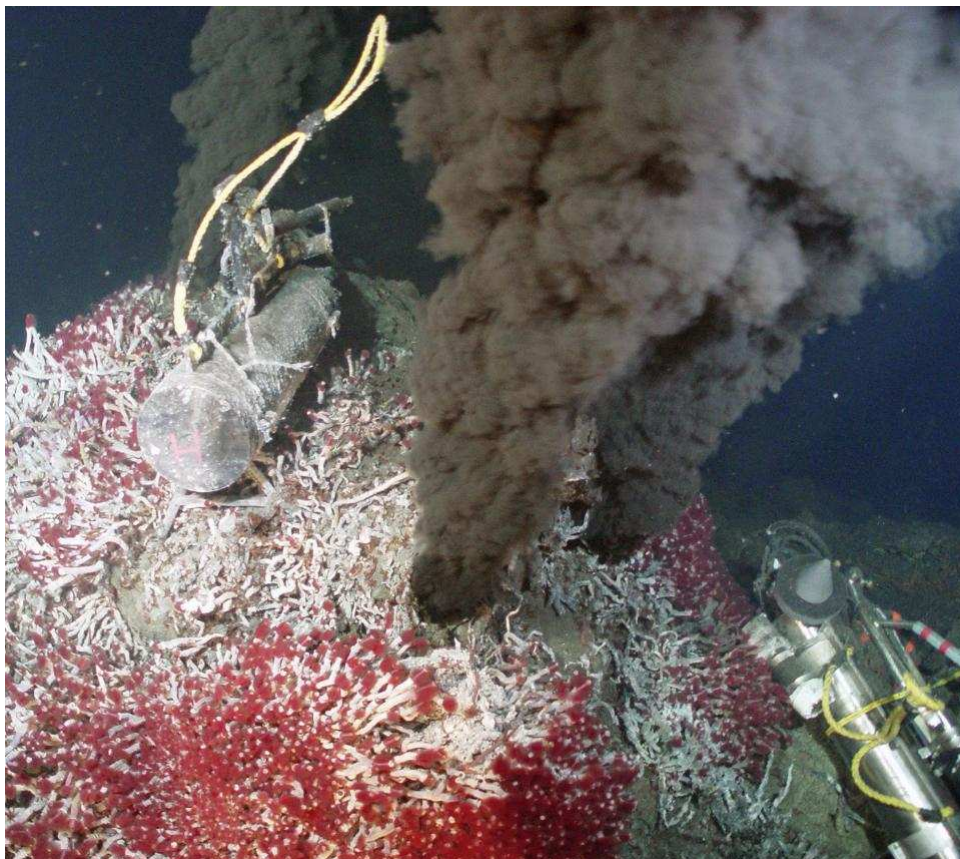
Il problema fondamentale è: perché una particella così massiccia è stabile non decade in particelle più leggere? Nel loro modello, gli autori ipotizzano che il gravitino supermassiccio abbia carica elettrica frazionaria e che pertanto non possa decadere in altre particelle. La rarità di questa particella spiegherebbe anche il motivo per cui è difficilissima da osservare. Per quanto sicuramente molto lenta, con una massa del genere potrebbe attraversare la Terra indisturbata, ma essendo elettricamente carica, lascerebbe comunque traccia del suo passaggio. Per questo i due autori propongono di usare le rocce del nostro pianeta come rivelatore e di cercare difetti nel reticolo dei cristalli. Con un tempo di esposizione di miliardi di anni, qualche gravitino la Terra deve averlo incontrato di sicuro.

Emiliano Ricci

BIOLOGIA

All’origine degli eucarioti

Passo in avanti fondamentale per l’ecologia microbica

SPL/AGF

Ci sono voluti 12 anni, ma ne è valsa la pena. Per la prima volta, dai fanghi delle profondità oceaniche si è riusciti a coltivare un microrganismo del gruppo da cui si pensa discendano gli eucarioti, i cosiddetti Asgard archaea. E si sono già tratte indicazioni preziose sull’origine delle prime cellule con nucleo e organuli.

Hiroyuki Imachi, della Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology di Yokosuka, non ha ancora pubblicato il lavoro su una rivista con *peer review*, ma il *preprint* su bioRxiv ha già suscitato entusiasmo. «È la conquista della Luna per l’ecologia microbica», ha commentato Phil Hugenholtz, microbiologo all’Università del Queensland, in Australia.

Gli Asgard archaea sono un gruppo di archaea scoperti da poco tramite il rilevamento del loro DNA nel fondo dei mari, e hanno geni che codificano per varie proteine che prima erano note solo negli eucarioti, cioè gli organismi unicellulari o pluricellulari provvisti di un nucleo che contiene la maggior parte del DNA. Perciò si è ipotizzato che ne siano gli antenati. Un paio di miliardi di anni fa, uno di questi archaea avrebbe inglobato un batterio con cui viveva in sintrofia, cioè scambiando nutrienti con vantaggio reciproco; l’archaea degradava sostanze organiche e cedeva al batterio idrogeno ed elettroni. Il batterio inglobato sarebbe poi diventato il mitocondrio.

Ma era impossibile studiare direttamente gli archaea, perché vivono in ambienti estremi come le fumarole subacquee e con grande lentezza, e nessuno era riuscito a coltivarli. Imachi ce l’ha fatta, isolando un organismo battezzato *Prometheoarchaeum syntrophicum*. Così ha visto che *P. syntrophicum* vive in sintrofia con un batterio, e ha appendici ramificate che possono averlo avvolto e incorporato. «Non sappiamo quale specie abbia generato gli eucarioti, ma è plausibile che il processo sia stato questo. Ora indagare sarà più facile», conclude Imachi.

Giovanni Sabato

La mutazione che per millenni ci ha difeso dall’AIDS

Perché per decine di migliaia di anni siamo rimasti immuni ai virus dell’immunodeficienza, a differenza degli altri primati? Una ricerca pubblicata su «Cell Host & Microbe» da Xuefeng Ren, dell’Università della California a Berkeley, e colleghi spiega che cosa ci ha protetti così a lungo.
Le cellule dei primati hanno sulla superficie una proteina, chiamata teterina, che si lega alle vescicole contenenti i virus impedendo loro di lasciare la cellula ospite per infettarne altre. Se non ci sono virus, la teterina viene continuamente rimossa.
Come contromisura, il virus dell’immunodeficienza delle scimmie (o SIV), ha evoluto una proteina chiamata Nef, che si lega alla teterina e a un’altra proteina di superficie, AP-2, inducendone la rimozione anche in caso di infezione. In questo modo le particelle virali possono uscire indisturbate da una cellula per poi infettarne altre.
Per nostra fortuna, una mutazione apparsa nei primi esseri umani ha alterato la forma della teterina eliminando cinque amminoacidi, i componenti di base delle proteine. Questa mutazione ha impedito a Nef di legarsi, proteggendoci dall’infezione. Almeno fino a circa cent’anni fa, quando un SIV trasmesso a un essere umano ha evoluto una proteina Vpu che agisce come Nef. Era nato l’HIV, la variante umana del virus dell’immunodeficienza.

Eugenio Melotti

BIOLOGIA EVOLUTIVA

Le grandi diventano piccole

La regola dell'insularità non vale solo per gli animali ma anche per le piante

John Game/Wikimedia Commons/CC BY 2.0

I grandi si fanno piccoli mentre i piccoli diventano grandi. La cosiddetta regola di Foster, o dell'insularità, è uno dei principi più noti e allo stesso tempo controversi della biologia evolutiva. Prevede che, nelle isole, l'esiguità delle risorse naturali spinga gli animali di grande taglia a ridurre le proprie dimensioni mentre la scarsità di predatori e di competizione induce quelli piccoli ad aumentarle. Nel verificare la validità, cosa che avviene da oltre mezzo secolo, ricercatori della Victoria University di Wellington, in Nuova Zelanda, si sono focalizzati per la prima volta sulle piante, anziché sugli animali.

Nello studio, pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», il biologo evolutivo Matthew Biddick e colleghi hanno misurato statura, estensione della chioma e dimensione dei semi di 175 specie vegetali presenti in dieci arcipelaghi dell'Oceano Pacifico, confrontandole con quelle raggiunte dalle medesime piante sulla terraferma. I ricercatori hanno integrato la letteratura scientifica esistente con descrizioni floristiche, campioni di erbari e misurazioni sul campo, ponendo attenzione alla storia evolutiva e alla latitudine degli esemplari della terraferma inclusi nel confronto.

I risultati suggeriscono che, nelle isole, piante e animali sono soggetti in buona parte agli stessi meccanismi ecologici alla base della regola di Foster. Con una notevole eccezione: se statura e chioma delle specie insulari obbedivano effettivamente alla regola, le dimensioni dei semi la trasgredivano. Secondo gli autori, è la dimostrazione che la sua validità dipende dai tratti funzionali: per facilitare la dispersione via mare, e vincere la competizione intraspecifica, i semi di tutte le piante insulari sono risultati significativamente più grandi di quelli delle corrispettive specie cresciute sulla terraferma.

Davide Michielin

Un vaccino vegetale

Potenziando un meccanismo di difesa intrinseco ma poco efficiente, è stata sviluppata una sorta di vaccino che protegge le piante dai virus. Quando è infettata, la cellula vegetale si difende tagliando l'RNA virale in migliaia di frammenti, alcuni dei quali (i piccoli RNA interferenti o siRNA) guidano un complesso di enzimi che individua gli altri genomi virali nella cellula e li distrugge. Il processo è detto silenziamento dell'RNA virale. Un limite è che pochi dei tanti siRNA prodotti guidano il silenziamento, e finora non si sapeva come riconoscerli. Un gruppo guidato da Sven-Erik Behrens, della tedesca Martin-Luther-Universität di Halle-Wittenberg, e che include Vitantonio Pantaleo, dell'Istituto per la protezione sostenibile delle piante del Consiglio nazionale delle ricerche a Bari, mostra su «Nucleic Acids Research» un test che rileva gli RNA efficaci. Irrorando le foglie con uno spray che contiene questi RNA, le piante di tabacco hanno ottenuto una protezione del 90 per cento contro un patogeno virale. «È un metodo molto più semplice che modificare geneticamente le piante, permette di rispondere in fretta alla comparsa di resistenze e potrà aiutare contro molti patogeni diversi», concludono gli autori.

Giovanni Sabato

Secondo l'OMS servono più studi sulle microplastiche

Per ora non c'è segno che le minuscole particelle di plastica nell'acqua di rubinetto o in bottiglia danneggino la nostra salute, quindi non vale la pena di spendere soldi per rilevarne la presenza o per rimuoverle. Anche perché molte vengono già eliminate dai normali trattamenti di depurazione degli scarichi o di potabilizzazione. Vale invece la pena di continuare a indagarle, perché gli studi sono pochi e di qualità modesta e la microplastica in circolazione aumenterà sempre più.
Lo afferma un rapporto sulle microplastiche dell'Organizzazione mondiale della Sanità (OMS). Le paure di danni chimici, o per i patogeni associati alle particelle, non trovano riscontro negli studi, spiega l'OMS. Le particelle superiori a 150 micrometri (un micrometro equivale a un milionesimo di metro) non dovrebbero essere assorbite dal corpo, e quelle più piccole lo sono in misura limitata. Quelle dell'ordine dei nanometri (miliardesimi di metro) potrebbero essere assorbite un po' di più, ma se ne sa poco. Oltre ad approfondire gli studi, standardizzando i metodi di misurazione e capendo meglio da dove vengono le microparticelle e come rimuoverle, l'OMS raccomanda comunque di ridurre uso e dispersione di plastiche, a beneficio dell'ambiente e di altri aspetti della salute umana. (*GiSa*)

Due miliardi di persone rischiano di rimanere a secco

«È la crisi più grave di cui nessuno parla». Così Andrew Steer, presidente del World Resources Institute (WRI), ha presentato l'ultimo rapporto sulla disponibilità di acqua dolce nel mondo.

Usando un nuovo modello idrologico, al WRI hanno scoperto che i consumi idrici sono raddoppiati dal 1960 a oggi e, incrociando questo dato con la portata di falde e precipitazioni, che ci sono 44 nazioni del mondo, fra cui l'Italia, che hanno un alto livello di stress idrico: per periodi più meno lunghi rischiano che le forniture d'acqua dolce non coprano la domanda. Di queste, 17 nazioni, fra cui l'India e quasi tutto il Nord Africa e il Medio Oriente, con 1,7 miliardi di abitanti, hanno un livello di stress idrico estremo: in una scala da 1 a 5, per esempio, il Qatar è a 4,97. «In quei paesi ormai può bastare un anno di siccità per innescare carenze di acqua dolce riguardanti milioni di persone, come accaduto nel 2018 a Città del Capo, in Sudafrica, e nel 2019 a Chennai, in India. Aumento della popolazione e cambiamento climatico renderanno questa eventualità sempre più probabile», dice Steer.

I rimedi, dal taglio degli sprechi alla dissalazione, ci sarebbero. Ma secondo il WRI sono ancora poco applicati perché la percezione del rischio è insufficiente. (*AlSa*)

Le polveri non perturbano così tanto le nubi

Con le nubi che schermano la luce solare il suolo si scalda meno, quindi a sua volta contribuisce meno al riscaldamento dell'aria. Ma le polveri che emettiamo con le nostre attività antropiche modificano le proprietà delle nubi stesse. In generale queste emissioni producono un ulteriore raffreddamento, tuttavia i processi che si innescano nell'interazione tra polveri e nubi sono complessi e ci sono notevoli incertezze sull'entità dei loro effetti, che diventano importanti quando si cerca di stimare quantitativamente il futuro riscaldamento globale. Ora un articolo pubblicato su «Nature» da Velle Toll, dell'Università di Reading, nel Regno Unito, e colleghi fornisce un contributo importante per ridurre questa incertezza.
Tramite un'accurata analisi di 15 anni di dati forniti dallo spettroradiometro MODIS di un satellite della NASA e confrontando quello che accade in nubi «pulite» e in nubi che invece contengono polveri, i ricercatori hanno scoperto che queste ultime hanno un effetto minore di quanto si pensasse. Tutto questo potrà portare a una minore incertezza nella valutazione dell'effetto raffreddante delle nubi nei modelli e quindi a un'attività di proiezione futura del riscaldamento globale più affidabile. (*AnPa*)

Universal Images Group/AGF (*donne indiane in fila per l'acqua*); myshkovsky/iStock (*emissioni ciminiere*)

Un robot serpente nel cervello

Nell'ampia categoria dei robot ispirati alla natura, quelli striscianti, simili a vermi o serpenti, sono tra i preferiti dagli scienziati robotici, che fanno a gara nel trovare le soluzioni più ingegnose per renderli sempre più sottili e capaci di muoversi con precisione. In questo campo spicca la recente invenzione dello Zhao Lab del Massachusetts Institute of Technology di Boston, fondato e diretto dal Xuanhe Zhao, che ha sviluppato un robot serpentiforme di diametro inferiore al millimetro, capace di muoversi nei minuti capillari del nostro cervello. È realizzato in un materiale soffice, con una struttura continua e senza giunzioni, e può spostarsi in spazi assai angusti sfruttando un controllo basato su campi magnetici.

Il gruppo che lo ha realizzato, coordinato da Yoonho Kim, non lo ha testato proprio in un cervello umano, ma in un modello 3D in silicone. Il corpo è realizzato in idrogel autolubrificante, in cui sono disperse microparticelle magnetiche che permettono di controllarlo e indirizzarlo dall'esterno. Descritto su «Science Robotics», il robot avrebbe lo scopo, superati test clinici di biocompatibilità con il sangue umano, di rimuovere aneurismi nei vasi cerebrali o effettuare la pulizia delle carotidi. (*RiOl*)

L'AIFA conferma: le vaccinazioni sono sicure

I vaccini sono sicuri, come conferma il rapporto *Vaccini 2018* dell'Agenzia italiana del farmaco (AIFA), che raccoglie i dati sui loro effetti negativi registrati lo scorso anno basandosi sul sistema di farmacovigilanza. Su circa 18 milioni di dosi di singoli vaccini somministrate nel 2018 sono giunte all'AIFA solo 5236 segnalazioni di reazioni avverse, di cui 1202 considerate «gravi», cioè 31 casi ogni 100.000 dosi. L'11 per cento delle segnalazioni è arrivato dagli stessi cittadini tramite il sito web dall'agenzia.

Le reazioni più frequenti sono state febbre fra 38 e 39,5 gradi, reazioni cutanee locali o generalizzate e agitazione. Reazioni come diarrea, svenimenti, astenia, dolore, pianto, cefalea e inappetenza si sono verificate in meno di 400 casi. Ancora più rare, sotto i 100 casi, le convulsioni per febbre elevata. Nel 93 per cento dei casi non gravi la reazione avversa si era già risolta o era migliorata al momento della segnalazione, mentre nelle reazioni più gravi questo era avvenuto il 67 per cento delle volte. Ci sono stati solo sei casi di reazione anafilattica, con pericolo di vita, e 70 in cui alla vaccinazione è seguita la morte, ma questi ultimi casi hanno riguardato persone con gravissime patologie preesistenti e il succedersi dei due eventi non sembra correlato. (*AlSa*)

I dolori del giovane Giove

Anche Giove, come la Terra, è stato vittima di un impatto catastrofico ai primordi del sistema solare. Ma se per la Terra le conseguenze sono evidenti (la nascita della Luna), per Giove sono più difficili da notare. C'è voluta la sonda Juno, in orbita attorno al pianeta dal 2016, per scoprirle, ovviamente non sulla sua mutevole superficie gassosa, ma nelle profondità del suo nucleo. I dati registrati dalla sonda della NASA mostrano che Giove non ha un nucleo compatto, come ci si aspetterebbe dai modelli di formazione dei pianeti, ma esteso fino a metà del suo raggio. Inoltre gli elementi più pesanti di idrogeno ed elio non sono stratificati, ma distribuiti in tutto il volume del nucleo.

Per spiegare le osservazioni, Shang-Fei Liu, della Sun Yat-Sen University di Zhuhai, in Cina, e colleghi hanno elaborato simulazioni per valutare gli scenari che avrebbero potuto generare un nucleo così particolare. Come descritto su «Nature», lo scenario più probabile è l'impatto con un protopianeta con massa pari a dieci volte quella della Terra. Un urto di cui Giove porta ancora le cicatrici, nonostante sia avvenuto 4,5 miliardi di anni fa. (*EmRi*)

NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS/Gabriel Fiset

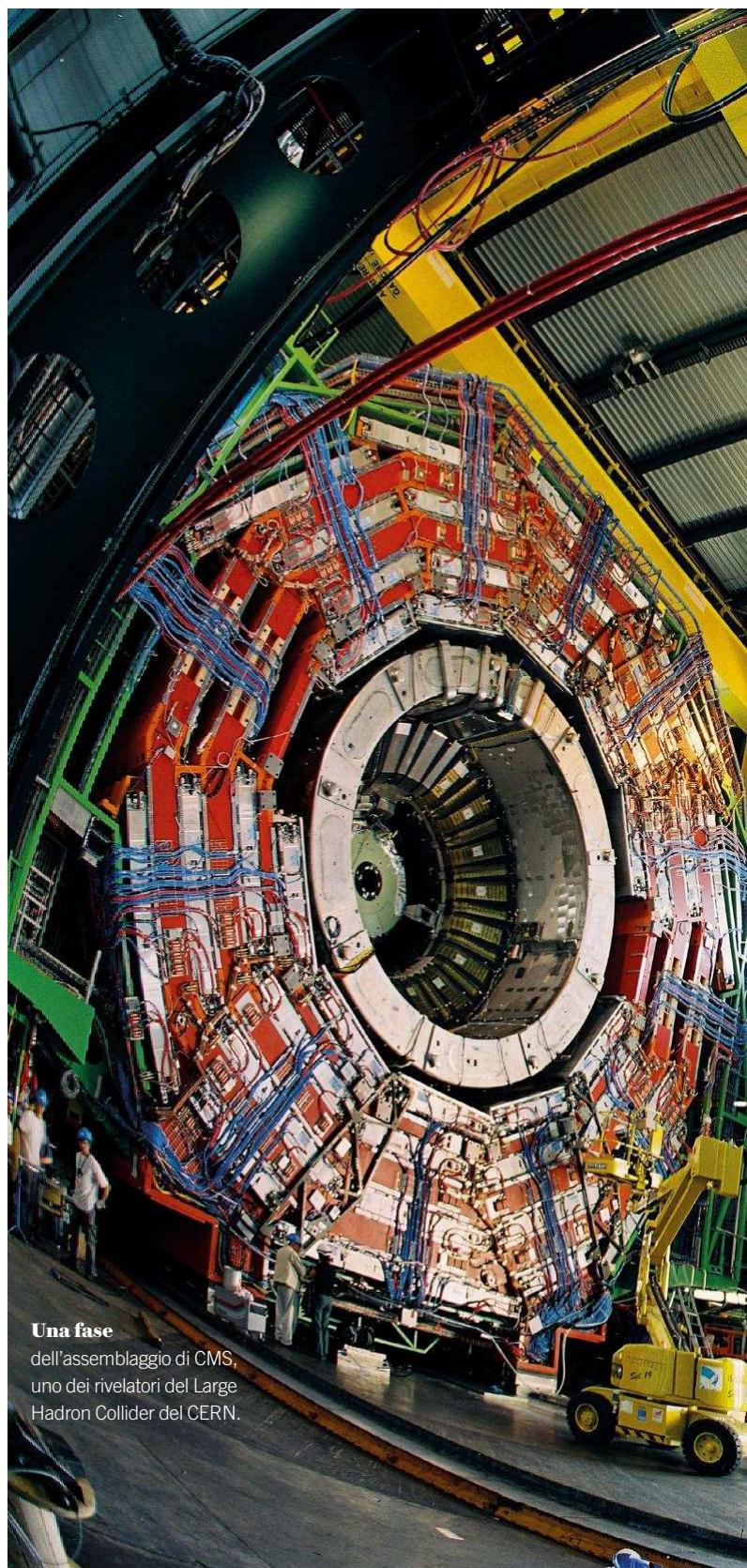
Scoperta un'area per le emozioni negative

La corteccia dell'insula è un'area cerebrale ancora misteriosa. Raccoglie informazioni sensoriali, emotive, omeostatiche e così via, e si pensa che possa mediare la risposta comportamentale a condizioni di forte disagio, come pericoli esterni o l'assunzione di cibi nocivi.
Uno studio pubblicato di recente su «Nature Neuroscience» è fra i primi a chiarire come questo avvenga.
Nadine Gogolla,del Max-Planck-Institut für Neurobiologie di Martinsried, e colleghi hanno osservato che nei topi la corteccia dell'insula comunica con altri centri cerebrali, l'amigdala e il nucleo accumbens. Quando nello studio veniva attivata la via verso l'amigdala, si osservava un comportamento compatibile con la paura: i topi mangiavano meno e smettevano di esplorare l'ambiente. La soppressione di questa connessione rendeva invece i roditori molto audaci.
L'attivazione della connessione con il nucleo accumbens portava invece i topi in uno stato simile alla malattia; nello specifico, smettevano del tutto di mangiare. Quando la via veniva soppressa, curiosamente, i roditori mangiavano anche se soffrivano di nausea. La corteccia dell'insula potrebbe dunque avere un ruolo in condizioni di ansia patologica, non solo nei topi, ma anche negli esseri umani. (*FeSg*)

FISICA

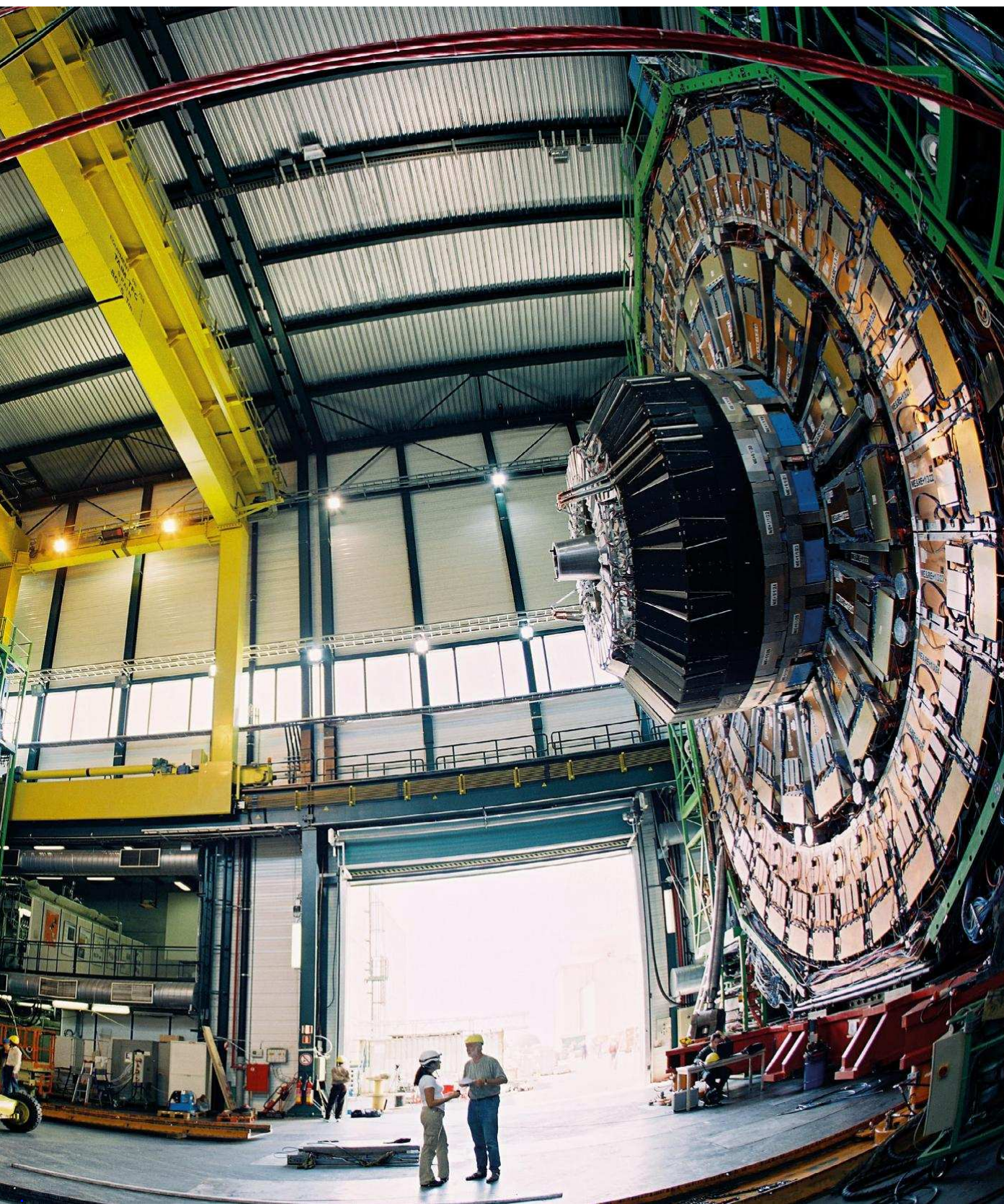
Il senso dei grandi

Gruppi di ricerca internazionali vorrebbero costruire giganteschi acceleratori per esplorare territori ignoti del mondo subatomico. Ma le loro proposte sollevano qualche dubbio

Al Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra, in questo momento non circola nemmeno un protone. L'acceleratore di particelle è fermo per il Long Shutdown 2, una pausa di due anni che servirà a installare nuovi componenti e ripristinare le parti logorate. I ricercatori però lavorano a pieno regime. Si devono analizzare enormi quantità di dati, sviluppare nuovi modelli e programmare i prossimi passi. Nel 2026 entrerà in funzione una versione evoluta dell'acceleratore: HL-LHC (HL sta per «High Luminosity», alta luminosità), che rispetto a LHC produrrà un numero maggiore di collisioni tra protoni all'energia di 14 teraelettronvolt (TeV). E dopo?

Una fase dell'assemblaggio di CMS, uno dei rivelatori del Large Hadron Collider del CERN.

acceleratori

di Andrea Capocci

Cortesia Patrice Loiez/CERN

Sembra prematuro chiedersi oggi che cosa succederà al CERN nel prossimo futuro. Ma la realizzazione di un nuovo acceleratore richiede molti anni di progettazione, negoziati economici, sviluppo di nuove soluzioni tecniche e la costruzione vera e propria. LHC, per esempio, ha richiesto circa 25 anni di preparazione e 10 miliardi di euro a carico dei 23 Stati membri del CERN.

I piani a lungo termine del CERN sono riassunti nella *European Particle Physics Strategy,* un documento da rinnovare periodicamente. Il prossimo aggiornamento è previsto per il 2020. Secondo l'ultima versione, datata 2013, entro il 2020 l'Europa «dovrà intraprendere lo studio di nuovi acceleratori in un contesto globale, in particolare verso infrastrutture avanzate, basate su collisioni protone-protone ed elettrone-positrone».

La strada dei grandi acceleratori proseguirà dunque possibilmente in collaborazione con le principali potenze scientifiche: Stati Uniti, Giappone e Cina. Per capire in quale direzione, però, bisognerà attendere ancora un anno. Tra le proposte ci sono acceleratori circolari (come LHC) e lineari, da realizzarsi in Europa o altrove. Il progetto più ambizioso è il Future Circular Collider (FCC), nato da una collaborazione guidata dai fisici Michael Benedikt e Frank Zimmermann, entrambi del CERN, che coinvolge ricercatori di 150 università, enti di ricerca e industrie di 34 paesi.

Se realizzato, FCC sarà un acceleratore-monstre: un anello di 97,75 chilometri di circonferenza (quasi quattro volte LHC) al confine tra Francia e Svizzera, scavato a 300 metri di profondità per passare sotto il lago di Ginevra (*si veda il box nella pagina a fronte*). In una prima fase, chiamata «FCC-ee», nell'anello saranno fatti scontrare elettroni e positroni, particelle di antimateria speculari agli elettroni. (Sia gli elettroni sia i positroni fanno parte della famiglia di particelle elementari chiamate leptoni). L'energia delle collisioni di FCC-ee raggiungerà i 365 gigaelettronvolt (GeV). In valore assoluto è molto meno dei 13 TeV a cui è stato operativo LHC dal 2015 al 2018 (1 Tev equivale a 1000 GeV), ma sono valori difficilmente paragonabili: l'energia cinetica di una particella dipende dalla sua velocità e dalla sua massa, e un elettrone è 1800 volte più leggero di un protone.

Nella seconda fase, chiamata «FCC-hh», si scontreranno protoni. Queste particelle fanno parte della famiglia degli adroni, i cui membri sono composti da combinazioni di diversi tipi di quark. (I protoni quindi non sono particelle elementari, a differenza degli elettroni.) In FCC-hh, i protoni si scontreranno con un'energia di circa 100 TeV, otto volte più grande dell'energia di collisione dei protoni in LHC.

Le collisioni possono produrre nuove particelle, in base all'equivalenza tra energia e massa scoperta da Albert Einstein: $E = mc^2$. A loro volta, le particelle generate nelle collisioni interagiscono e decadono in altre particelle secondo leggi di probabilità sintetizzate nel modello standard, la teoria che descrive le particelle elementari e le interazioni fondamentali della materia. I rivelatori, infine, permettono agli scienziati di capire i processi fisici in atto e le particelle coinvolte osservando il risultato delle collisioni.

Andrea Capocci è fisico teorico. Dopo aver svolto attività di ricerca in Svizzera e in Italia, oggi lavora come giornalista scientifico per il quotidiano «il Manifesto» e per diverse testate *on line*.

Il progetto FCC prevede dunque un percorso simile a quello che ha portato alla costruzione del Large Electron-Positron Collider (LEP) negli anni ottanta e poi a LHC, realizzato nello stesso tunnel. Una volta completato il progetto, il CERN disporrebbe di un acceleratore simile a LHC, ma più grande e potente.

Curve e magnetismo

Comprendere come si possa passare dai 13 TeV attuali ai 100 TeV di FCC-hh, passando per i 365 GeV di FCC-ee, non è difficile. In un acceleratore circolare l'energia delle collisioni è proporzionale al raggio dell'anello in cui circolano le particelle e all'intensità del campo magnetico usato per curvare la traiettoria delle particelle. In particolare, per aumentare l'energia di otto volte occorre quadruplicare la lunghezza dell'anello e raddoppiare il campo magnetico. I magneti usati da LHC generano un campo magnetico di 8 tesla; per dare un'idea, il campo magnetico terrestre misura meno di un decimillesimo di tesla. A FCC-hh bisognerà arrivare a 16 tesla, ma magneti così potenti non sono stati ancora realizzati. È uno dei compiti dei ricercatori del CERN, nel caso in cui il progetto fosse approvato.

Il piano dovrebbe realizzarsi nei prossimi cinquant'anni. Inizialmente sarebbe realizzato il tunnel da 100 chilometri, in cui installare l'acceleratore di elettroni e positroni basato su tecnologie già collaudate. Lo scavo richiederà una quindicina d'anni e FCC-ee potrebbe essere operativo già intorno al 2040. Nel frattempo si avvierebbe il lungo programma di ricerca, sviluppo e produzione dei magneti da 16 tesla, per «accendere» l'acceleratore di protoni FCC-hh intorno al 2065 e mantenerlo operativo fino al 2090.

Il costo totale del progetto è stimato in circa 25 miliardi di euro e include il costo delle opere ingegneristiche, delle attività di ricerca e sviluppo per le attrezzature e del funzionamento dell'acceleratore. Ma i proponenti hanno preparato diversi «piani B», se il piano fosse giudicato troppo ambizioso.

Si potrebbe risparmiare sulla realizzazione del tunnel, installando i nuovi magneti nello stesso anello di LHC e spendendo «solo» 6,3 miliardi di euro, quasi 20 in meno rispetto al progetto principale. Ma non si raggiungerebbero i 100 TeV e l'opzione è piuttosto improbabile. Si potrebbe realizzare solo FCC-ee, costruendo il nuovo tunnel ma risparmiando sui magneti. Il costo totale scenderebbe così a 9,2 miliardi di euro. Infine, c'è la scommes-

IN BREVE

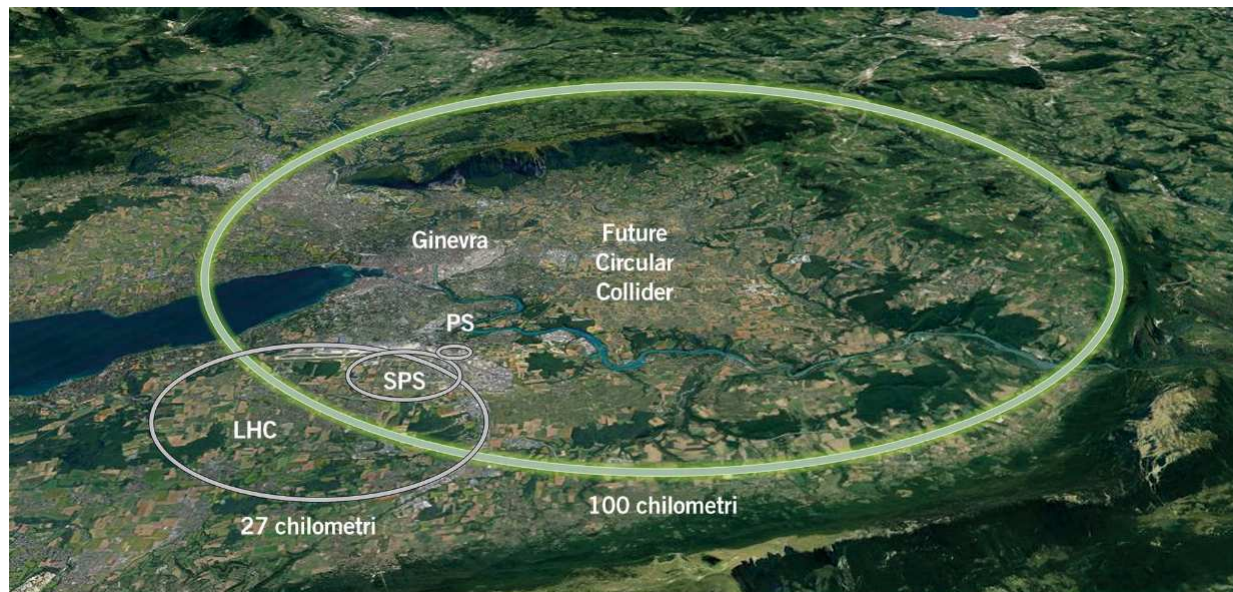
Una collaborazione globale guidata da fisici del CERN propone la costruzione del Future Circular Collider (FCC), un gigantesco acceleratore che dovrebbe prendere il posto del Large Hadron Collider (LHC), sempre del CERN.

Altri gruppi di ricerca internazionali propongono di costruire enormi acceleratori circolari simili a FCC, o anche lineari, per raggiungere energie fuori portata per gli acceleratori attuali.

Queste proposte entusiasmano gli addetti ai lavori, ma qualcuno ha sollevato dubbi sugli obiettivi scientifici di queste macchine gigantesche, sugli investimenti necessari alla loro costruzione e sulle collaborazioni tra paesi.

Il signore degli anelli

Il progetto per FCC prevede un anello di circa 100 chilometri di circonferenza (quasi quattro volte LHC) al confine tra Francia e Svizzera, scavato a 300 metri di profondità per passare sotto il lago Lemano (o lago di Ginevra). In una prima fase, chiamata «FCC-ee», nell'anello si scontreranno elettroni e positroni, particelle di antimateria speculari agli elettroni. L'energia delle collisioni raggiungerà i 365 gigaelettronvolt (GeV), molto meno dei 13 teraelettronvolt (TeV) di LHC. Nella seconda fase, chiamata «FCC-hh», si scontreranno protoni con un'energia di circa 100 TeV. FCC-ee potrebbe essere operativo già intorno al 2040; FCC-hh intorno al 2065. Il costo totale del progetto è stimato in circa 25 miliardi di euro, e per ora coinvolge ricercatori da 150 università, enti di ricerca e industrie di 34 paesi.

Cortesia Panagiotis Charitos/CERN

sa più ardita: costruire l'anello da 100 chilometri e concentrare tutte le risorse sullo sviluppo dei nuovi magneti, facendo a meno dell'acceleratore per elettroni e positroni. L'acceleratore FCC-hh inizierebbe così a lavorare già nel 2043 e i costi scenderebbero di 5 miliardi di euro. Però, si rinuncerebbe a usare la tecnologia esistente per realizzare esperimenti di frontiera con FCC-ee.

La scelta non è facile. Secondo un vecchio adagio dei fisici delle particelle «i leptoni vanno bene per le misurazioni precise ma per le scoperte servono gli adroni». Dunque i protoni di FCC-hh sarebbero preferiti a elettroni e positroni di FCC-ee. Ma LHC ha dimostrato che si possono ottenere misurazioni di grande precisione anche in un acceleratore di adroni. Quindi la distinzione tra i due approcci non è così significativa, secondo il direttore delle ricerche del CERN, il tedesco Eckhard Elsen.

Gli obiettivi scientifici di FCC

La costruzione di un acceleratore da 100 TeV permetterebbe di esplorare processi fisici oggi fuori portata per LHC. Questa prospettiva eccita i fisici teorici, che sperano di vedere confermate o smentite ipotesi finora rimaste sulla carta, o di ottenere nuove osservazioni che richiedano teorie innovative.

Il primo obiettivo riguarda il bosone di Higgs, la cui esistenza era stata prevista indipendentemente dal britannico Peter W. Higgs e dal belga François Englert nel 1964, e poi confermata da LHC nel 2012 e premiata con il Nobel per la fisica l'anno successivo. Il bosone di Higgs era l'ultimo tassello mancante del modello standard e la sua osservazione era l'obiettivo principale di LHC. La rilevazione dell'Higgs ha confermato l'ipotesi secondo cui le particelle elementari che compongono il modello standard acquistano la loro massa interagendo proprio con il campo di Higgs.

Nelle varie configurazioni, FCC funzionerà da «fabbrica» di bosoni di Higgs, che potranno essere studiati nel massimo dettaglio. L'acceleratore permetterà di chiarire la cosiddetta «rottura della simmetria elettrodebole», avvenuta 10^{-18} secondi dopo il big bang, quando la temperatura dell'universo scese sotto i 10^{15} kelvin.

Secondo i modelli teorici, prima di quel momento la forza elettromagnetica e la forza nucleare debole, responsabile della radioattività, erano unite a formare un'unica forza chiamata «elettrodebole». Ma 10^{-18} secondi dopo il big bang avvenne una transizione di fase, cioè un brusco mutamento dell'organizzazione della materia e dell'energia come quello che si osserva, per esempio, nella trasformazione dell'acqua in ghiaccio; la transizione di fase separò l'interazione elettromagnetica, mediata dai fotoni, che non hanno massa, dall'interazione debole, mediata dallo scambio di particelle dotate di massa dette bosoni *W* e *Z*. Dato che le interazioni fondamentali corrispondono a certe simmetrie nelle equazioni che descrivono il modello standard, il fenomeno appena descritto è denominato «rottura della simmetria elettrodebole».

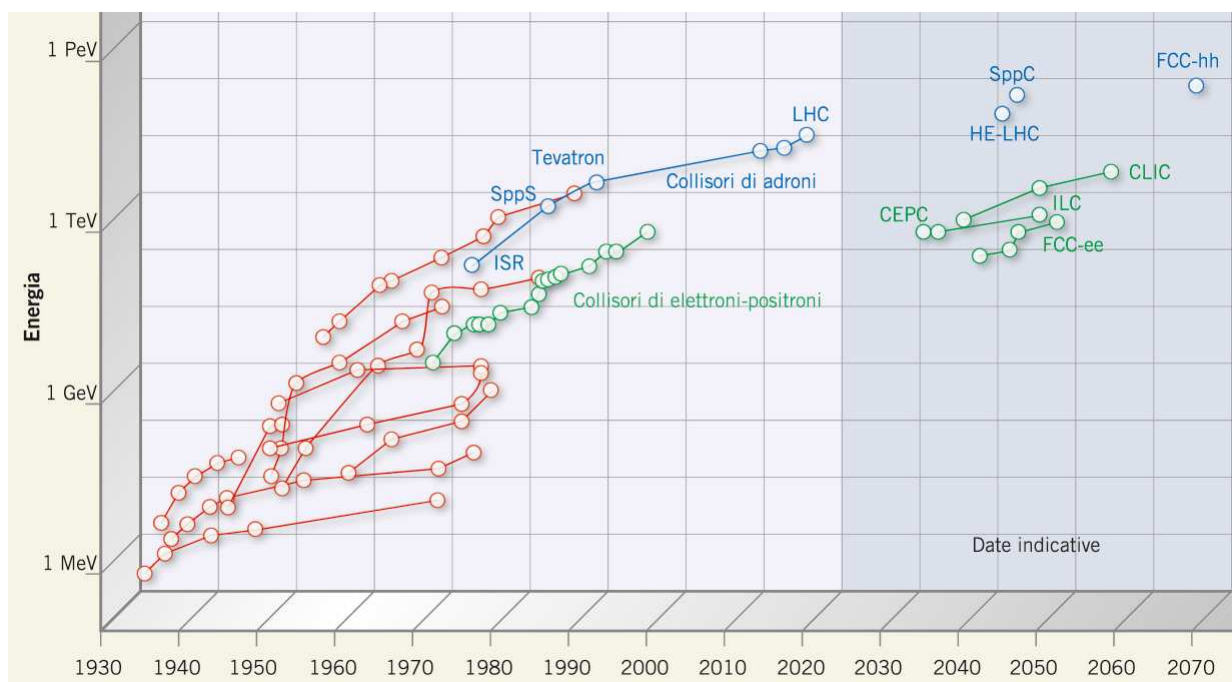
Addirittura, i fisici teorici ritengono che ancora prima, nei primissimi momenti dopo il big bang, un'unica interazione unificasse l'interazione elettrodebole e l'interazione «nucleare forte», quella che tiene insieme i quark di cui sono composti protoni e neutroni. È la cosiddetta «teoria della grande unificazione», da cui per ora rimane esclusa la forza di gravità.

CRONOLOGIA DELLE ENERGIE

L'evoluzione delle macchine

Ne hanno fatta di strada gli acceleratori di particelle dal 1928, anno in cui il fisico norvegese Rolf Wideröe costruì la prima di queste macchine ad Aquisgrana, in Germania. Da allora le loro energie sono aumentate sempre di più, come illustra il grafico qui sotto.

Per le macchine a bersaglio fisso (*fixed target, linee e punti rossi*) l'energia indicata è quella del fascio di particelle che colpisce un bersaglio fermo. Per i collisori (*linee e punti verdi e blu*), come per esempio il Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra, in cui fasci di protoni in movimento collidono tra loro, è l'energia nel centro di massa della collisione.

Grafico di Danilo Sossi; fonte: *The FCC Magnet Program: Challenges and Opportunites for HTS*, di Luca Bottura, 1st Workshop on Accelerator Magnets in HTS, 21-23 maggio 2014, Amburgo

«Il bosone di Higgs è indispensabile per spiegare il fenomeno di rottura della simmetria dell'interazione elettrodebole, che è la sorgente della massa dei bosoni *W* e *Z*, e delle altre particelle del modello standard», conferma il fisico teorico Michelangelo Mangano del CERN, uno degli ideatori di FCC. «Ma l'origine del bosone di Higgs, e del meccanismo che dà al bosone di Higgs le proprietà necessarie per indurre la rottura della simmetria, è oscura». Le misurazioni con LHC non bastano. «Per esempio, per una misurazione precisa di come il bosone di Higgs interagisce con se stesso, acquisendo esso stesso una massa, servirà FCC», continua.

Non è l'unico aspetto oscuro del modello standard. Per esempio, il quark *top* che proprio Mangano contribuì a scoprire nel 1994 all'acceleratore Tevatron di Chicago, pesa circa 200 volte più di un protone, 40 volte più del quark *bottom* (il secondo più pesante) e 36.000 volte più del quark *up* (il più leggero): «C'è una relazione profonda fra il bosone di Higgs e il quark *top*, che rende così intensa la forza di interazione fra Higgs e *top*?», si chiede Mangano.

Inoltre, FCC potrebbe permettere di osservare «nuova fisica», cioè fenomeni che non si possono spiegare con il modello standard. Secondo alcune teorie, per esempio, l'Higgs è un aggregato di particelle ancora più elementari che non sono state scoperte, un po' come i quark. Per confermare o escludere questa ipotesi, è necessario esplorare energie dell'ordine delle decine di TeV.

Infine, uno degli obiettivi principali di FCC riguarderà la materia oscura. Secondo le stime degli astronomi essa costituisce l'80-90 per cento della massa dell'universo. La sua esistenza è necessaria per spiegare molti fenomeni osservati, come la rotazione anomala delle galassie. Ma non abbiamo idea di come sia fatta, quindi non è compresa nel modello standard. Non risente né dei campi elettromagnetici, e in effetti non è visibile ai telescopi, né dell'interazione forte. Dunque, oltre alla forza di gravità, che ci ha permesso di scoprirla, la materia oscura potrebbe essere sensibile solo all'interazione debole. Potrebbe essere composta da «particelle massive debolmente interagenti» (in inglese *weakly interactive massive particles*, o WIMP). Finora i tentativi di osservare le WIMP sono falliti, ma secondo Mangano non si tratta di una bocciatura definitiva.

«Le WIMP sono una classe molto ampia e interessante di possibili candidati, che non può essere interamente esplorata senza un collisore del tipo di FCC, che potrebbe scoprire, o escludere in modo definitivo, che la materia oscura sia una WIMP».

Le obiezioni al progetto

«Non siamo nemmeno sicuri che la materia oscura sia costituita da particelle», obietta Sabine Hossenfelder, fisica teorica all'Istituto per gli studi avanzati di Francoforte. «Se fosse una particella leggera, non dovremmo cercarla con un acceleratore più potente. Avrebbe più senso raccogliere più dati in campo astrofisico». Hossenfelder è una strenua oppositrice del progetto FCC.

Dal suo seguitissimo blog fino alle pagine del «New York Ti-

mes», Hossenfelder non perde occasione per ribadire le sue perplessità. «Negli ultimi quarant'anni – ha spiegato ai suoi lettori – i fisici hanno prodotto tantissime previsioni sulla nuova fisica oltre il modello standard, ed erano tutte sbagliate (...) Non abbiamo elementi per ritenere che ci sia qualcosa di nuovo da scoprire a energie superiori, a meno di non raggiungere energie un miliardo di volte più elevate di quelle a cui arriverà il prossimo acceleratore».

Per Hossenfelder è colpa di una cattiva metodologia scientifica: «Si progettano esperimenti sulla base di previsioni sbagliate, gli esperimenti smentiscono le previsioni, senza conferme sperimentali la teoria non migliora e fornisce nuove previsioni sbagliate. E così via», ha scritto di nuovo sul suo blog. A suo avviso, investimenti così grandi impediscono il progresso in altri filoni di ricerca teorica più promettenti come la gravità quantistica o i fondamenti della meccanica quantistica, che potrebbero trovare un'applicazione tecnologica più rapidamente.

Anche Jared Kaplan, fisico teorico alla Johns Hopkins University di Baltimora, è pessimista sulla possibilità che dalle eventuali scoperte di nuovi acceleratori possano derivare applicazioni tecnologiche: «Abbiamo un'ottima conoscenza della natura e la rilevanza degli esperimenti per le tecnologie utili all'uomo è sempre più bassa», ha spiegato in un'intervista al sito Vox. «Ci sono molti altri grandi misteri in altri campi della fisica», aggiunge: «La maggior parte degli esperimenti che cercano la materia oscura costa 10 milioni di dollari, non 20 miliardi. Sarebbe più sensato finanziare un centinaio di questi esperimenti piuttosto che costruire un acceleratore».

Una stima del bilancio economico ha mostrato che ogni euro investito nel Large Hadron Collider ha generato un ritorno di 1,2 euro

Non sono obiezioni pretestuose, perché gli acceleratori richiedono investimenti pubblici la cui corretta allocazione è una responsabilità sociale importante per gli scienziati. Le ricerche del CERN hanno prodotto nuove conoscenze, e tecnologie di grande impatto come il World Wide Web o la PET. È sufficiente a giustificare l'investimento presso un'opinione pubblica che vede diminuire gli investimenti pubblici in altri settori in nome dell'austerità?

«Senza dubbio – concorda Benedikt – un grande investimento come quello di FCC richiede un dibattito sui problemi aperti in fisica e su come gli acceleratori possono contribuire, insieme ad altre infrastrutture, ad affrontarli. Spesso i risultati degli acceleratori si aggiungono a quelli provenienti da altri esperimenti di dimensioni più piccole». Il direttore di FCC aggiunge anche: «Non stiamo progettando solo un acceleratore più grande, ma un'infrastruttura che possa stimolare un ricco e variegato programma di ricerca intorno a sé e avviare nuovi esperimenti per la comunità scientifica mondiale».

«Nella scienza, come nella vita, l'esplorazione è spesso più importante della scoperta», spiega Mangano con un'analogia. «La scoperta dell'America ha dato fama eterna a Cristoforo Colombo, ma l'esplorazione delle nuove terre ha chiarito che si trattava di un nuovo continente. L'esistenza del bosone di Higgs è stata proposta cinquant'anni fa per risolvere una difficoltà della teoria, ma il modello standard non ne spiega l'origine. Nella scienza spesso si scopre prima il "cosa", poi il "come" e infine, talvolta, il "perché". Con il bosone di Higgs siamo ancora a livello del "cosa". Qual è la sua origine? È una particella elementare o è composta? Ne esistono di simili? Come si crea la sua massa?». Secondo Mangano, la futura generazione di acceleratori è indispensabile per cercare una risposta a queste domande fondamentali.

Quanto rende un acceleratore

Come per tutte le grandi infrastrutture, anche per gli acceleratori si effettuano analisi costi-benefici. All'Università di Milano, il gruppo di economisti guidato da Massimo Florio ha provato a stimare il bilancio economico di LHC. Florio ha considerato il valore delle tecnologie sviluppate dalle aziende fornitrici del CERN e il capitale umano dei ricercatori e degli studenti che hanno lavorato e studiato presso LHC, misurato dai loro avanzamenti di carriera e di reddito. E non ha considerato le ricadute a lungo termine della scoperta dell'Higgs, oggi imprevedibili.

Le conclusioni dell'analisi sono positive: l'acceleratore LHC ha realizzato un utile di quasi 3 miliardi di euro a fronte di un investimento totale, tra il 1993 e il 2025, di 13 miliardi. Dunque, ogni euro investito in LHC ha generato un ritorno di 1,2 euro.

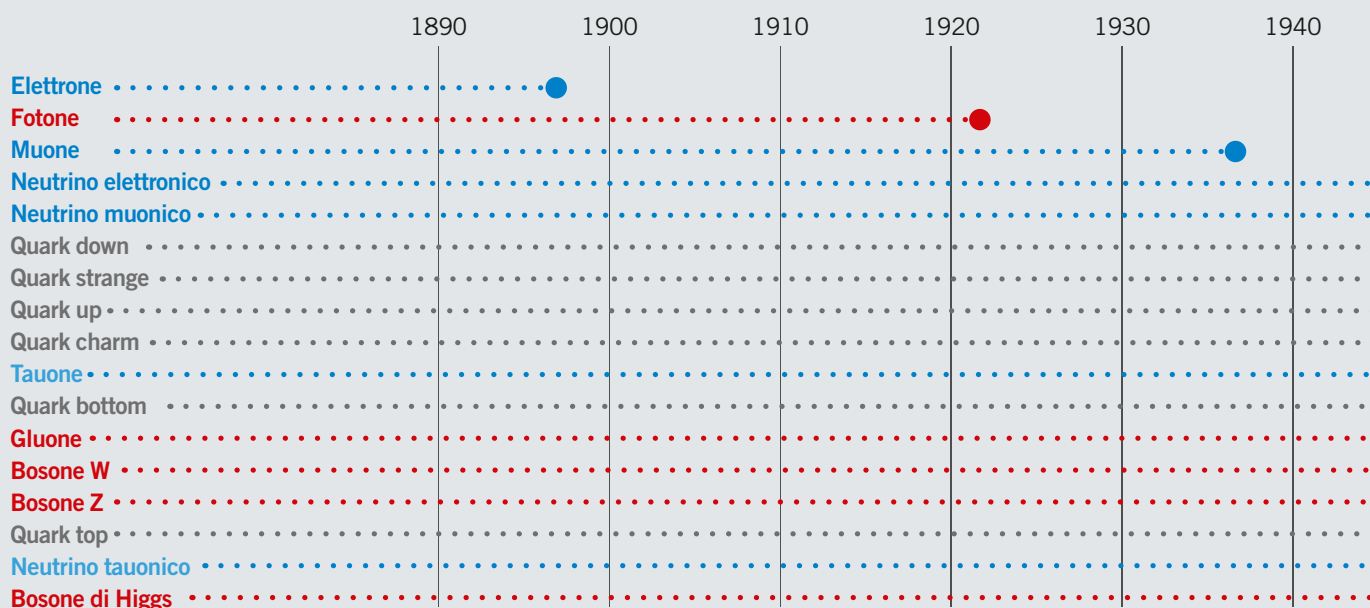
Che cosa si può dire di FCC? «Eguagliare le prestazioni di LHC sarà difficile, perché FCC richiederà lo scavo di un nuovo tunnel, un'operazione molto costosa», ammette Florio. La buona notizia è che i contribuenti sembrano favorevoli all'investimento. Secondo un sondaggio effettuato dal gruppo di Florio sull'opinione pubblica francese e commissionato dalla collaborazione FCC, i cittadini sono disposti a spendere fino a 4 euro all'anno a testa per un nuovo acceleratore di particelle. «Più di quanto pagano adesso: il CERN costa ai francesi 2,7 euro l'anno di tasse», sottolinea Florio.

La tecnologia chiave

L'incertezza maggiore sulla fattibilità e sui costi di FCC-hh riguarda lo sviluppo dei magneti. Il campo magnetico necessario a curvare la traiettoria dei protoni è generato da bobine percorse da correnti di migliaia di ampere, costruite con materiali superconduttori. Questi ultimi sono leghe metalliche che, a bassissima temperatura, non oppongono alcuna resistenza al passaggio della corrente elettrica. Al CERN i conduttori sono mantenuti a –271,3 gradi Celsius, cioè 1,9 gradi sopra lo zero assoluto. Questo, tra l'altro, rende il CERN il luogo più freddo dell'universo: nemmeno nello spazio interstellare si scende sotto i –270 gradi.

I magneti saranno anche la principale fonte di consumo energetico. Alimentare FCC-hh richiederà 4 terawattora (Twh) all'anno, circa quanto l'intera provincia di Firenze. Per raggiungere un campo magnetico da 16 tesla, nelle bobine si userà una lega a base di niobio e stagno perché quella attualmente in uso, di niobio e titanio, non resisterebbe agli 11.000 ampere previsti.

La realizzazione dell'acceleratore FCC-hh richiederà la produzione in serie di 4700 magneti da distribuire lungo l'anello e capaci di resistere alle condizioni estreme di vuoto assoluto, bassissime temperature e particelle veloci quasi come la luce. Il niobio-stagno però è un materiale fragile, e tende a sbriciolarsi. Secondo Luca Bottura, che guida il gruppo di sviluppo dei magneti, ci vorrà ancora qualche anno per realizzare un prototipo al CERN e poi «identificare partner industriali qualificati, passare dai prototipi industriali alla produzione in serie di qualche migliaio di unità». Nelle previsioni, per arrivare a questa fase saranno necessari oltre 9 miliardi di euro e vent'anni di lavoro.

La scoperta delle particelle del modello standard

In definitiva, le incognite tecnologiche sulla strada di FCC sono molte e la sua realizzazione è tutt'altro che scontata. Deciderà lo European Strategy Group, in cui siedono i rappresentanti degli Stati membri del CERN e dei principali laboratori europei di fisica delle particelle. Saranno loro ad aggiornare la strategia europea per la fisica delle particelle valutando tutte le proposte in campo. E non c'è solo FCC.

I concorrenti

Altri gruppi di ricerca internazionali propongono di costruire acceleratori lineari di tipo diverso: tunnel rettilinei lunghi decine di chilometri in cui far scontrare elettroni e positroni. Queste particelle sono più facili da analizzare, ma i tunnel lineari hanno un solo punto di rilevazione al centro, mentre un tunnel circolare permette di installare più esperimenti contemporaneamente (a LHC ce ne sono quattro).

In teoria, nulla costringe a puntare su unico acceleratore. «Sarebbe bello realizzare più di una di queste grandi infrastrutture, e sfruttare la complementarità tra progetti con caratteristiche fisiche diverse per sondare la natura su scale estremamente piccole», sostiene Benedikt. Ma ammette: «Gli acceleratori diventano sempre più grandi e sofisticati. Solo con un impegno internazionale e un concreto piano di distribuzione degli investimenti necessari tra i partecipanti sul lungo periodo possiamo sperare di vedere in funzione almeno una delle infrastrutture».

Una proposta è l'International Linear Collider (ILC), elaborata da una collaborazione internazionale coordinata dal giapponese Shinichiro Michizono. La potenza energetica prevista è stata ridotta a 250 GeV proprio per limitare i costi, circa 7,5 miliardi di dollari. Tuttavia il Giappone, che aveva manifestato l'interesse a ospitare l'acceleratore, nel marzo 2019 ha rimandato la decisione finale almeno fino all'autunno a causa del notevole impegno economico.

Anche il CERN ha un progetto per un acceleratore lineare, guidato dal norvegese Steinar Stapnes. Si chiama Compact Linear Collider (CLIC) e dovrebbe essere realizzato in diversi stadi di sviluppo: inizialmente elettroni e positroni viaggeranno in un tunnel di 11 chilometri con energia totale di 380 GeV. Nelle successive evoluzioni, il tunnel arriverà a 50 chilometri di lunghezza e l'energia toccherà i 3 TeV, tantissimo per particelle così leggere. Dal 2013, le collaborazioni ILC e CLIC si sono unite in un'unica collaborazione (Linear Collider Collaboration) che coinvolge oltre 2000 ricercatori in una trentina di paesi del mondo.

Il rivale cinese

Il rivale più temibile per FCC è un progetto dell'Istituto per la fisica delle alte energie dell'Accademia cinese delle scienze sviluppato sotto la direzione del fisico Yifang Wang. Sembra una fotocopia del progetto del CERN: un tunnel circolare da 100 chilometri da realizzare in Cina in cui far scontrare elettroni e positroni, chiamato Circular Electron Positron Collider (CEPC). In un secondo tempo nello stesso tunnel sarà installato il Super proton-proton Collider (SppC), che raggiungerà gli stessi 100 TeV programmati per FCC. I cinesi prevedono di usare magneti superconduttori a base di ferro, ancora da sviluppare ma che potrebbero funzionare a temperature leggermente superiori rispetto a quelli di FCC. Anche il CERN sta esplorando questa soluzione, in collaborazione con l'Istituto superconduttori, materiali innovativi e dispositivi del Consiglio nazionale delle ricerche di Genova.

Dalla loro, gli scienziati cinesi hanno un'infrastruttura più facile da costruire: non bisogna scavare sotto un lago e le procedure burocratiche per acquisire i terreni sono più snelle. Di contro, hanno scarsa esperienza nella progettazione e realizzazione di un acceleratore di questa tipologia. Le competenze sviluppate dai fisici, ingegneri, chimici, matematici, informatici del CERN sono uniche e difficilmente riproducibili.

Anche in Cina, però, non sono tutti favorevoli al progetto. Il novantasettenne fisico teorico Chen-Ning Yang, primo Nobel cinese nel 1957, ritiene che il suo paese non si possa permettere

Le Scienze

I fisici descrivono la realtà in termini di particelle elementari che compongono la materia e loro interazioni, mediate anch'esse da particelle elementari. Questa descrizione va sotto il nome di modello standard, il cui ultimo tassello, il bosone di Higgs, è stato scoperto nel 2012 all'LHC del CERN di Ginevra. In generale, grazie agli acceleratori sono state scoperte 13 (*cerchi vuoti*) delle 17 particelle che compongono il modello standard.

un progetto così costoso e difficile, e smorza la retorica nazionalista: se gli esperimenti saranno diretti al 90 per cento da stranieri «un eventuale premio Nobel verrebbe assegnato a un cinese?», si è chiesto in articolo pubblicato sulla piattaforma di *social media* cinese WeChat.

Yang pone un problema reale: che si costruisca al CERN o in Cina, il prossimo grande acceleratore sarà necessariamente globale. Nessun paese dispone delle competenze e delle risorse sufficienti a realizzarlo da solo. Un ruolo importante sarà svolto dagli Stati Uniti. Dopo la bocciatura del Superconducting Super Collider nel 1993 e la chiusura del Tevatron nel 2011, gli Stati Uniti non ospitano alcun grande acceleratore. Ma scienziati e ingegneri statunitensi hanno partecipato alla progettazione e alla realizzazione di LHC. Inoltre il numero di ricercatori degli Stati Uniti che usano le strutture del CERN è più grande di quello dei ricercatori di qualunque altro paese. Appare improbabile, in un periodo di guerre commerciali con la Cina, che abbandonino l'Europa.

Tra gli scienziati occidentali serpeggia anche una certa diffidenza nei confronti della collaborazione con la Cina, a causa di standard di democrazia molto diversi. «Se si verificasse una nuova Tienanmen, gli scienziati stranieri si unirebbero alle proteste? Io lo farei», ha detto alla rivista «Foreign Policy» Nima Arkani-Hamed, fisico teorico all'Institute for Advanced Study di Princeton fuggito dall'Iran giovanissimo al seguito del padre, anche lui fisico e inviso a Teheran. «Una scelta del genere significherebbe bruciare la collaborazione, gettando al vento anni e carriere», spiega il fisico sperimentale Andrea Giammanco, membro della collaborazione CMS del CERN che ha partecipato alla scoperta del bosone di Higgs. «È un rischio enorme per le migliaia di scienziati coinvolti», molti dei quali preferirebbero non dover scegliere tra un investimento professionale di anni e i propri principi.

La discussione è aperta più che mai. La stesura definitiva della nuova strategia europea è prevista per maggio 2020. Lo scorso maggio a Granada, in Spagna, c'è stato un incontro per l'aggiornamento della strategia europea sulla fisica delle particelle, in cui 600 scienziati in tutto il mondo hanno presentato e dibattuto le varie proposte. Il prossimo appuntamento è previsto per gennaio 2020 a Bad Honnef, in Germania, dove saranno tirate le somme del dibattito in vista del documento finale da sottoporre al CERN.

Rispetto ai concorrenti, il CERN non vanta solo un'esperienza ineguagliabile in materia di acceleratori. Oltre che un laboratorio, il CERN è un'organizzazione internazionale: può strutturare piani finanziari che si proiettano per decenni perché il contributo dei paesi membri è fissato da trattati. Nel 2019, per esempio, l'Italia contribuisce con 118 milioni di euro, circa un decimo del budget complessivo. Lo ha ricordato la fisica italiana Fabiola Gianotti, che ha guidato uno dei gruppi che ha rilevato l'Higgs e oggi dirige il CERN. Coordinare un'organizzazione di 23 Stati è più difficile rispetto ad agenzie nazionali come quelle cinesi, giapponesi o statunitensi. Ma proprio la natura sovranazionale mette il CERN al riparo dalle tensioni geopolitiche e, anzi, può contribuire ad allentare. È un ruolo che ha nel suo DNA. Nessuno, non solo tra gli scienziati, ha interesse a rinunciarvi. ■

PER APPROFONDIRE

Future Circular Collider. Conceptual Design Report. CERN, gennaio 2019. Disponibile all'indirizzo web: **https://fcc-cdr.web.cern.ch.**

Lost in Math: How Beauty Leads Physics Astray. Hossenfelder S.,Basic Books, 2018.

Tunnel Vision: The Rise and Fall of the Superconducting Super Collider. Riordan M., Hoddeson L., Kolb A.W., University of Chicago Press, 2015.

A caccia del bosone di Higgs. Magneti, governi, scienziati e particelle nell'impresa scientifica del mondo. Maiani L. e Bassoli R., Mondadori, Milano, 2013.

Forecasting the Socio-Economic Impact of the Large Hadron Collider: A Cost-Benefit Analysis to 2025 and Beyond. Florio M., Forte S. e Sirtori E., in «Technological Forecasting and Social Change», Vol. 112, pp. 38-53, novembre 2016. **https://arxiv.org/abs/1603.00886**.

NEUROSCIENZE

Come la materia diventa mente

Una nuova disciplina descrive come emerge l'attività mentale da interazioni bene orchestrate tra aree cerebrali differenti

di Max Bertolero e Danielle S. Bassett

Le reti pervadono la nostra vita. Ogni giorno usiamo reti intricate di strade, ferrovie, rotte marittime e vie aeree solcate da voli commerciali. Ed esistono anche oltre la nostra esperienza diretta. Basti pensare al web, alla rete elettrica e all'universo, di cui la Via Lattea è un nodo infinitesimale in una rete di galassie apparentemente infinite. Eppure, pochi di questi sistemi di connessioni interattive eguagliano per complessità quello che si trova nella nostra testa.

IN BREVE

Come fa il cervello a far emergere chi siamo? La domanda ha dato vita a un nuova disciplina, la neuroscienza delle reti, che usa la teoria dei grafi per generare modelli delle connessioni cerebrali che ci permettono di leggere, far di conto, o più semplicemente sederci e tamburellare con le dita.

La teoria dei grafi, usata anche in chimica, in teoria quantistica dei campi e in linguistica, può costruire modelli dei cammini fisici che costruiscono le reti funzionali da cui emergono le nostre capacità cognitive, come la visione, l'attenzione o l'autocontrollo.

Comprendendo le reti a livelli crescenti di astrazione, i ricercatori hanno iniziato a colmare il divario tra la materia e la mente. I vantaggi pratici di questi studi potrebbero includere nuove tecniche di diagnosi e il trattamento di disturbi come la depressione.

Illustrazione di Mark Ross Studios

Da qualche anno a questa parte le neuroscienze hanno conquistato maggiore visibilità, e le immagini variopinte che illustrano le regioni del cervello «accese» durante un test mentale sono diventate sempre più familiari. Tuttavia, in questa descrizione del funzionamento del cervello umano manca la comprensione di come queste regioni distinte interagiscono per dare origine a noi, alla nostra natura. Il nostro e altri laboratori hanno preso in prestito il linguaggio di una branca della matematica, la teoria dei grafi, che ci permette di analizzare, sondare e prevedere le interazioni complesse del cervello, colmando così il divario apparentemente vasto tra la frenetica attività elettrica neurale e una serie di capacità cognitive, come percezione sensoriale, memoria, processi decisionali, apprendimento di nuovi compiti e avvio di un movimento. Questo nuovo settore, la *network neuroscience*, o neuroscienza delle reti, si fonda, rafforzandola, sulla teoria che particolari regioni del cervello eseguano attività ben precise. In sostanza, la natura del cervello – e quindi chi siamo come esseri coscienti – è definita da una sterminata rete di 100 miliardi di neuroni, con almeno 100 trilioni di punti di connessione, le sinapsi.

La neuroscienza delle reti cerca di cogliere questa complessità. E oggi possiamo creare un modello dei dati forniti dall'imaging cerebrale sotto forma di un grafo composto di nodi e di lati (o segmenti). In un grafo, i nodi rappresentano le unità della rete, per esempio i neuroni oppure, in un altro ambito, gli aeroporti. I lati fanno da connessioni tra nodi – pensate a un neurone intrecciato al successivo oppure alle rotte aeree. Nel nostro lavoro, abbiamo ridotto l'intero cervello umano a un grafo con circa 300 nodi. Diverse aree possono essere collegate da lati che rappresentano le connessioni strutturali del cervello: spessi fasci di cavi tubulari, i cosiddetti tratti di materia bianca, che connettono le regioni cerebrali. Questa immagine del cervello come rete unificata ha già offerto un quadro più chiaro del funzionamento cognitivo, oltre al vantaggio pratico di permettere una diagnosi più efficace di alcuni disturbi psichiatrici. In futuro, la conoscenza delle reti cerebrali potrebbe tradursi in un modello per un'intelligenza artificiale migliore, in nuovi farmaci e in tecniche di stimolazione elettrica per alterare i circuiti neurali difettosi nella depressione; e forse anche nello sviluppo di terapie genetiche per curare le malattie mentali.

I cervelli sono gigantesche orchestre di neuroni che si attivano insieme secondo schemi molto specifici

La musica della mente

Per capire come le nostre capacità cognitive sono fondate sulle reti, prendiamo l'analogia con un'orchestra che suona una sinfonia. Fino a poco tempo fa i neuroscienziati studiavano essenzialmente il funzionamento di singole regioni cerebrali isolate, l'equivalente neurale di sezioni d'orchestra separate. Nel cervello, questa stratificazione rappresenta un approccio che risale a Platone. In poche parole, prevede di dividere la natura alle sue giunzioni e poi studiare le singole componenti ottenute.

Se da un lato è utile capire come l'amigdala contribuisce a elaborare le emozioni, dall'altro è vitale capire come un violino genera suoni acuti. Eppure, persino una lista completa delle regioni cerebrali e delle loro funzioni – la visione, il movimento, le emozioni e così via – non ci racconta in che modo il cervello funziona realmente; come, del resto, un elenco degli strumenti non ci dà la ricetta dell'*Eroica* di Beethoven.

Gli esperti di neuroscienza delle reti stanno venendo a capo di

Danielle S. Bassett è professore associato al Dipartimento di bioingegneria dell'Università della Pennsylvania, dove studia le reti nei sistemi fisici e biologici.

Max Bertolero è borsista nel gruppo di ricerca sui sistemi complessi diretto da Bassett. Ha conseguito il dottorato in neuroscienze dei sistemi all'Università della California a Berkeley, e una laurea in filosofia e psicologia alla Columbia University.

questi misteri esaminando in che modo ciascuna regione cerebrale è inclusa in una rete più ampia di altre regioni, e creando la mappa delle connessioni tra esse per studiare in che modo ciascuna è inclusa in quella grande rete integrata che è il cervello.

Ci sono due impostazioni principali. Primo, esaminare la connettività strutturale cattura gli strumenti dell'orchestra cerebrale. È il mezzo fisico per produrre la musica, e la strumentazione unica di un particolare brano musicale vincola ciò che può essere suonato. Gli strumenti sono importanti, ma non sono la musica. In altre parole, come un insieme di strumenti non è la musica, così un complesso di cavi non rappresenta il funzionamento del cervello.

Secondo, i cervelli viventi sono gigantesche orchestre di neuroni che si attivano insieme secondo schemi molto specifici. Noi ascoltiamo la musica del cervello misurando la correlazione tra l'attività di ciascuna coppia di regioni, segno che stanno lavorando di concerto. Questa misura dell'attività congiunta è nota come connettività funzionale e, per tornare alla nostra analogia, la consideriamo come il riflesso della musica del cervello. Se due regioni si attivano con le stesse fluttuazioni varianti nel tempo, si considerano connesse funzionalmente. Questa musica è importante come i decibel prodotti da uno strumento. Il volume della musica cerebrale si può considerare come il livello di attività di segnali elettrici che eccitano questa o quell'altra area cerebrale.

Tuttavia, in ogni istante alcune aree di quest'organo di circa 1300 grammi sono più attive di altre. Ognuno di noi ha sentito dire che l'uomo usa una piccola frazione della sua capacità cerebrale. In realtà, in un particolare istante è attivo l'intero cervello, ma un determinato compito modula l'attività di una sua parte soltanto, rispetto al suo livello basale di attività. Questa organizzazione non implica che voi realizziate soltanto metà del vostro potenziale cognitivo. In realtà, se tutto il vostro cervello fosse intensamente attivo nello stesso istante, sarebbe come se tutti i membri dell'orchestra suonassero al massimo volume possibile. Un simile scenario provocherebbe il caos, non una comunicazione. Il suono assordante non trasmetterebbe le sfumature emotive di un grande brano musicale. È il tono, sono i ritmi, il tempo e le pause strategiche che comunicano informazione, sia in una sinfonia sia nella vostra mente.

Modularità

Come un'orchestra può essere suddivisa in gruppi di strumenti appartenenti a famiglie differenti, così le reti cerebrali si possono separare in insiemi di nodi, i cosiddetti moduli. Tutti i cervelli sono modulari. Persino la rete di 302 neuroni del verme nematode *Caenorhabditis elegans* ha una struttura modulare. E i nodi all'in-

terno di un modulo condividono tra loro connessioni più forti che con i nodi di altri moduli.

Ciascun modulo del cervello ha una funzione precisa, proprio come ogni famiglia di strumenti ha un ruolo nella sinfonia. Recentemente abbiamo analizzato un grande numero di studi indipendenti che includeva più di 10.000 esperimenti con la risonanza magnetica funzionale (fMRI) su persone che eseguivano 83 differenti compiti cognitivi. Abbiamo così scoperto che compiti distinti corrispondevano a differenti moduli della rete cerebrale: esistono moduli dedicati all'attenzione, alla memoria e al pensiero introspettivo; e abbiamo scoperto che altri moduli sono dedicati all'udito, al movimento e alla visione.

Questi processi cognitivi sensoriali e motori coinvolgono singoli moduli contigui, buona parte dei quali è confinata in un singolo lobo del cervello. Abbiamo anche scoperto che le computazioni nei moduli non stimolano più attività in altri moduli, un aspetto importante dell'elaborazione modulare. Immaginate uno scenario in cui ogni musicista di un'orchestra debba cambiare le note eseguite ogni volta che un altro musicista ha cambiato le sue: l'orchestra entrerebbe in una spirale fuori controllo e produrrebbe suoni poco gradevoli. L'elaborazione nel cervello è simile: ciascun modulo deve saper funzionare in modo quasi indipendente.

Benché i moduli cerebrali siano in larga misura indipendenti, una sinfonia richiede che famiglie di strumenti siano suonate all'unisono. In definitiva, l'informazione generata da un modulo deve integrarsi con un altro modulo. Guardare un film esclusivamente con il modulo cerebrale della visione – senza avere accesso a quello delle emozioni – impoverirebbe molto l'esperienza.

Per questa ragione, al fine di completare molti compiti cognitivi, i moduli devono spesso operare insieme. Un compito per la memoria a breve termine – tenere a mente un nuovo numero di telefono – richiede la cooperazione di moduli uditivi, dell'attenzione e dell'elaborazione della memoria. Per integrare e controllare l'attività di molteplici moduli, il cervello usa gli *hub*, nodi dove si incontrano le connessioni originate da differenti moduli del cervello.

I moduli sincronizzati del cervello formano la vostra identità e contribuiscono a conservarla nel tempo

Alcuni moduli che esercitano un ruolo decisivo nel controllo e nell'integrazione dell'attività cerebrale sono meno discriminanti nelle loro azioni, perché le loro connessioni si estendono in modo globale e raggiungono molteplici lobi cerebrali. Per esempio, il modulo di controllo frontoparietale si espande sui lobi frontale, parietale e temporale. Si è sviluppato piuttosto recentemente nella scala temporale dell'evoluzione ed è particolarmente voluminoso negli esseri umani, se lo confrontiamo con i nostri antenati primati più prossimi. È l'analogo di un direttore d'orchestra e si attiva in numerosi compiti cognitivi.

Il modulo frontoparietale assicura che i molteplici moduli del cervello funzionino all'unisono. È profondamente coinvolto nella cosiddetta funzione esecutiva, che include i processi separati della presa di decisioni, della memoria a breve termine e del controllo cognitivo. Quest'ultimo è la capacità di sviluppare strategie complesse e di inibire un comportamento inadeguato.

Un'altra rete densamente interconnessa è il *modulo della salienza*, che aggancia la rete di controllo frontoparietale e contribuisce a una gamma di comportamenti legati all'attenzione e alla risposta a nuovi stimoli. Come esempio, guardate le due parole seguenti: blu e rosso. Se vi si chiede di rispondere con il colore della parola, reagirete molto più velocemente a quella impostata in rosso. Le reti della salienza e quella frontoparietale si attivano quando si risponde al colore verde perché dovete reprimere l'inclinazione naturale a leggere la parola come «blu».

Infine, il modulo di default si espande sugli stessi lobi della rete di controllo frontoparietale. Contiene molti hub ed è correlato a diversi compiti cognitivi, tra cui il pensiero introspettivo, l'apprendimento, il recupero dei ricordi, l'elaborazione delle emozioni, l'inferenza dello stato mentale altrui e persino il gioco d'azzardo. Un aspetto decisivo è che un danno a questi moduli ricchi di hub altera le connessioni funzionali in tutto il cervello e causa problemi cognitivi diffusi, come il cattivo tempo in un hub aeroportuale ritarda il traffico aereo in tutto il paese.

Connessioni personali

Benché i nostri cervelli abbiano determinate componenti di rete essenziali – moduli interconnessi da hub – ciascuno di noi mostra lievi variazioni nel modo in cui i nostri circuiti neurali sono cablati. I ricercatori hanno recentemente indagato a fondo questa diversità. In una fase iniziale dello Human Connectome Project, 1200 giovani volontari hanno partecipato a uno studio sull'architettura a rete del cervello. Obiettivo finale del progetto è includere l'intero arco della vita. Le reti della connettività strutturale e di quella funzionale di ciascun individuo sono state sondate con la fRMRI. Questi dati sono stati poi integrati da una batteria di test cognitivi e da questionari per analizzare 280 tratti cognitivi e comportamentali. I partecipanti fornivano informazioni sulla qualità del loro sonno, la frequenza con cui bevevano alcolici, le loro capacità linguistiche e di memoria e i loro stati emotivi. Neuroscienziati di tutto il mondo hanno poi analizzato con cura questo insieme straordinariamente ricco di dati per capire come le reti del nostro cervello codificano chi siamo.

Usando i dati di centinaia di partecipanti allo Human Connectome Project, il nostro e altri laboratori hanno dimostrato che gli schemi della connettività cerebrale formano una «impronta digitale» che distingue ciascun individuo. Le persone che hanno salde connessioni tra particolari regioni sono dotate di un ricco vocabolario e manifestano un'intelligenza fluida superiore e sanno anche ritardare la gratificazione; hanno poi solitamente un livello maggiore di istruzione e di soddisfazione nella vita, oltre a una memoria e a un'attenzione migliori. Altri, che hanno connessioni funzionali più deboli tra quelle stesse aree del cervello, hanno una minore intelligenza fluida, una storia di abuso di sostanze, un sonno carente e una minore capacità di concentrazione.

Ispirati da questa ricerca, abbiamo mostrato che quei risultati si potevano descrivere con particolari schemi di connessione tra hub. Se la vostra rete cerebrale ha nodi robusti con molte connessioni tra moduli, avrà anche moduli chiaramente separati tra loro, e voi sarete più bravi in vari compiti: dalla memoria a breve termine alla matematica, dal linguaggio alla cognizione sociale. In breve, i vostri pensieri, le vostre manie, i vostri sentimenti, i vostri punti deboli e di forza mentali sono codificati dalla specifica organizzazione del cervello, come rete unitaria e integrata. In sostanza, è la musica eseguita dal vostro cervello che fa di voi quello che siete.

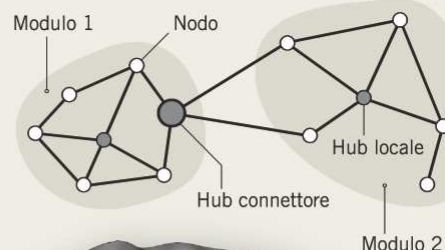
I moduli sincronizzati del cervello formano la vostra identità e contribuiscono a conservarla nel tempo. Le composizioni musicali che eseguono appaiono sempre simili. Questa somiglianza era

Decodificare trilioni di messaggi

La Via Lattea ha centinaia di miliardi di stelle, una frazione appena dei 100 trilioni di connessioni del cervello che ci permettono di percepire, pensare e agire. Per svelare questa complessità, i neuroscienziati delle reti creano una mappa, o «grafo», consistente di nodi collegati da lati che sono contenuti in moduli, i quali sono legati tra loro con nodi densamente connessi, detti hub.

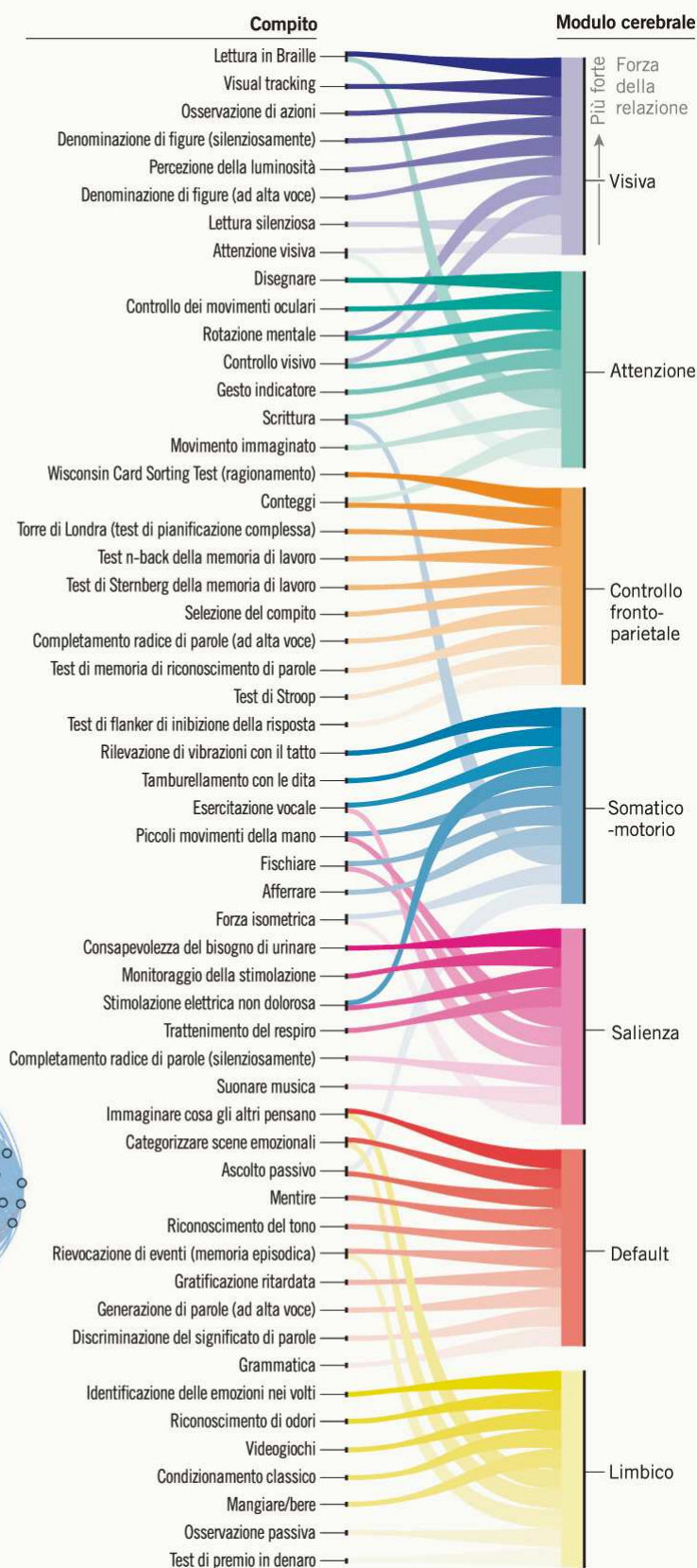
Dai moduli agli hub ai pensieri

Insiemi di nodi formano moduli che contribuiscono a elaborare, tra gli altri, la visione, l'attenzione e i comportamenti motori. **A** Alcuni nodi operano da hub locali che si collegano ad altri nodi nel loro stesso modulo. Un nodo che ha molti collegamenti con altri moduli è detto come hub connettore (il tipo più comune cui ci siamo riferiti in questo articolo). **B** Le sue differenti connessioni attraverso i moduli del cervello sono essenziali per molti compiti, in particolare per i comportamenti complessi **C**.

A Sette moduli fondamentali, indicati da colori diversi, sono sparsi tra aree del cervello talvolta scollegate tra loro.

B Questa visione laterale mostra gli hub connettori con i legami più forti con molti altri moduli, con i colori che indicano i sette moduli cerebrali fondamentali.

C Un grafo dei nodi e dei lati del cervello umano mostra gli hub connettori più forti rappresentati come cerchi più grandi. Il colore di ciascun nodo rappresenta il modulo a cui appartiene. I nodi si possono visualizzare come magneti che si respingono, dove i lati tra nodi agiscono come molle che li tengono insieme. I nodi strettamente connessi si aggregano tra loro. Gli hub connettori occupano il centro perché sono ben connessi con tutti i moduli.

Ricomporre il quadro

I moduli per la visione, l'attenzione e altre funzioni cognitive sono dedicati a compiti specifici, qui rappresentati spesso da test psicologici. I compiti più attivi sono in alto. Il modulo visivo, per esempio, è coinvolto nei compiti di denominazione, lettura e osservazione. Molti compiti richiedono più moduli. Per esempio, un test di rotazione mentale recluta sia il modulo visivo sia quello dell'attenzione. Alcuni moduli sono assegnati a compiti più astratti. Il modulo frontoparietale è coinvolto nella selezione dei compiti o nel rievocare liste. Il modulo di default partecipa agli stati emotivi soggettivi o all'ascolto passivo quando una persona è a riposo.

Grafica di Max Bertolero (cervelli e diagrammi di reti) e Jen Christiansen (carta dei compiti)

osservabile quando i partecipanti a due studi dello Human Connectome Project eseguivano vari compiti che prevedevano la memoria a breve termine, il riconoscimento delle emozioni altrui, il gioco d'azzardo, il tamburellamento con le dita, il linguaggio, la matematica, il ragionamento sociale e lo «stato di riposo» autoindotto in cui lasciavano vagare la mente. La cosa affascinante è che, in tutte queste attività, i circuiti funzionali delle reti hanno più somiglianze del previsto. Per riprendere la nostra analogia, non è come se il cervello suonasse Beethoven mentre studia matematica o un brano rap mentre riposa: la sinfonia nella nostra testa è lo stesso musicista che esegue lo stesso genere musicale. Questa coerenza deriva dal fatto che le vie fisiche del cervello – le connessioni strutturali – pongono vincoli alle strade di una rete che un segnale può percorrere. E quelle vie delineano come possono essere configurate le connessioni funzionali, per esempio per la matematica o per il linguaggio. Nella nostra metafora musicale, una grancassa non può eseguire una linea melodica per pianoforte.

Inevitabilmente, nella musica del cervello avvengono dei cambiamenti, come fossero nuovi arrangiamenti nella musica per orchestra. Le connessioni fisiche si modificano nel corso di mesi o di anni, mentre la connettività funzionale varia nell'ordine dei secondi, quando passiamo da un'attività mentale alla successiva. I cambiamenti della connettività strutturale e di quella funzionale sono importanti durante lo sviluppo cerebrale nell'adolescenza, quando vengono dati gli ultimi ritocchi al diagramma di cablaggio del cervello. È un periodo di importanza decisiva, perché i primi segni dei disturbi compaiono spesso nell'adolescenza o nella prima età adulta.

Un campo correlato alla nostra ricerca è lo studio dello sviluppo delle reti cerebrali lungo l'infanzia e l'adolescenza, fino all'età adulta. Questi processi sono guidati da cambiamenti fisiologici sottostanti, come l'esposizione a nuove idee e abilità, lo status socioeconomico e altre esperienze.

I moduli della rete cerebrale compaiono molto presto nella vita, nel ventre materno. La loro connettività, però, si perfeziona con la crescita. Il rinforzo coerente delle connessioni strutturali negli hub durante l'infanzia è associato a un aumento della separazione tra moduli e a un aumento dell'efficienza con cui le persone giovani svolgono attività esecutive, come un ragionamento complesso e l'autoregolazione. Abbiamo anche scoperto che il grado in cui i moduli si separano è più rapido nei bambini con uno status socioeconomico più elevato, a sottolineare l'impatto decisivo dell'ambiente. Se da un lato i cambiamenti nella connettività strutturale sono lenti, dall'altro le riconfigurazioni delle connessioni funzionali possono avvenire in pochi secondi o minuti. Questi mutamenti rapidi sono funzionali per passare da un compito a un altro e per l'enorme quantità di apprendimento richiesto persino da un compito semplice. In una serie di studi da noi pubblicati dal 2011 a oggi abbiamo scoperto che le reti formate da moduli che mutano rapidamente si manifestano in individui dotati di una funzione esecutiva e una capacità di apprendimento maggiori.

Per capire meglio che cosa stava avvenendo, abbiamo usato i dati di MyConnectome, uno studio nel quale Russell Pordrack, della Stanford University, si è sottoposto personalmente all'imaging cerebrale e a valutazioni cognitive tre volte alla settimana per oltre un anno. Benché i moduli siano essenzialmente autonomi e separati, talvolta la rete si riconfigura spontaneamente. Questa proprietà, detta flessibilità della rete funzionale, consente a un nodo che conserva forti connessioni funzionali all'interno di un modulo di stabilire improvvisamente molte connessioni con un modulo differente, modificando così il flusso d'informazione nella rete. Usando i dati di questo studio abbiamo scoperto che il reinstradamento delle connessioni di una rete cambia giorno per giorno, rispecchiando per esempio l'umore positivo, lo stato di attivazione e la stanchezza. Negli individui normali, questa flessibilità della rete è correlata a una migliore funzionalità cognitiva.

Il modo in cui sono configurate le connessioni cerebrali riflette anche lo stato di salute mentale

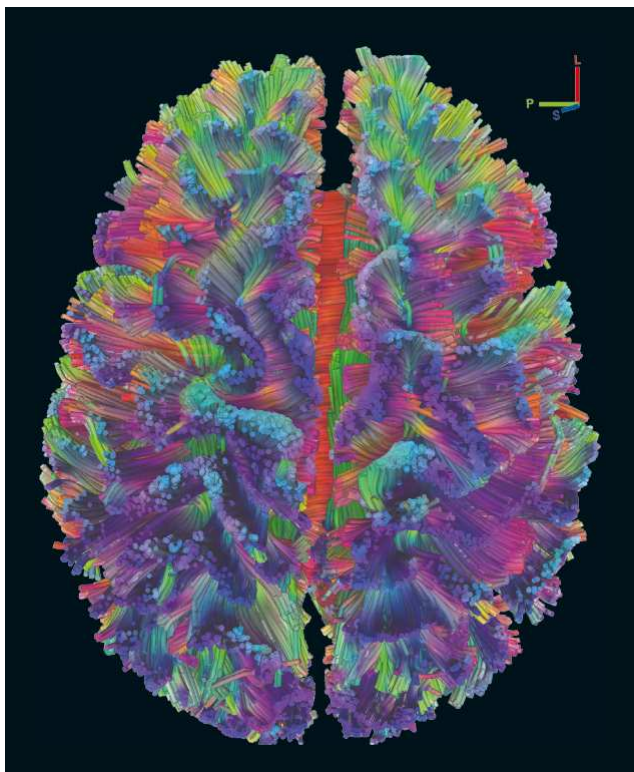
Note dissonanti

La configurazione delle connessioni cerebrali riflette anche lo stato di salute mentale: schemi di connettività aberranti accompagnano la depressione, la schizofrenia, il disturbo dello spettro autistico, il disturbo da deficit di attenzione, la demenza e l'epilessia. Buona parte delle malattie mentali non è confinata a una singola area cerebrale. I circuiti coinvolti nella schizofrenia si estendono ampiamente all'intero organo. Secondo l'ipotesi della disconnessione non c'è nulla di anomalo nei singoli moduli: il disturbo è legato a una sovrabbondanza di connessioni tra moduli.

In un cervello sano i moduli sono per lo più autonomi e separati, e la capacità di realizzare cambiamenti flessibili nelle connessioni di rete è vantaggiosa per il funzionamento cognitivo. Ma solo entro certi limiti. Abbiamo infatti scoperto che nel cervello di persone con schizofrenia e nei loro parenti di primo grado c'è una flessibilità eccessiva nel modo di riconfigurarsi delle reti. Possono così derivare allucinazioni uditive quando alcuni nodi modificano inaspettatamente i collegamenti tra i moduli della parola e i moduli uditivi. Questa mescolanza inattesa può sfociare nei mormorii di voci dentro la testa.

Come la schizofrenia, il disturbo di depressione maggiore (MDD) non è causato da una singola regione cerebrale anomala. Nella depressione sembrano coinvolti tre moduli specifici: quelli del controllo frontoparietale, della salienza e del modo di default. In effetti, i sintomi della depressione – disinibizione emotiva, sensibilità alterata a eventi emotivi e ruminazione – si abbinano a questi moduli. Di conseguenza, la comunicazione normale fra i tre moduli si destabilizza. Generalmente le attività tra modulo e modulo tirano e mollano per equilibrare l'elaborazione cognitiva dei segnali sensoriali con pensieri più introspettivi. Tuttavia, nella depressione domina il modo di default, e la persona che ne è vittima sprofonda nel pensiero ruminativo. Così, la musica cerebrale tende via via a sbilanciarsi e nella sinfonia prevale una sola famiglia di strumenti. Queste osservazioni hanno ampliato la nostra conoscenza delle proprietà di rete della depressione, perché uno schema della connettività cerebrale ci consente di diagnosticare particolari sottotipi del disturbo e di determinare quali aree trattare eventualmente con la stimolazione elettrica.

Le reti si evolvono

Oltre a studiarne lo sviluppo, chi studia neuroscienza delle reti si chiede perché le reti cerebrali hanno assunto la loro configurazione attuale nell'arco di decine di migliaia di anni. Le aree identificate come hub sono anche le sedi del cervello umano ampliatesi di più durante l'evoluzione, sino a diventare 30 volte più grandi di quelle del macaco. Hub cerebrali più grandi permettono quasi certamente una maggiore integrazione dell'elaborazione nei moduli e di alimentare computazioni più complesse.

Le molteplici connessioni di materia bianca in questa scansione rappresentano i dati usati per generare un modello delle vie fisiche del cervello. Le reti funzionali usano questi collegamenti strutturali per svolgere una vasta gamma di compiti cognitivi.

Un altro modo di studiare queste strutture è generando reti al computer e sottoponendole a pressioni evolutive. Nel nostro laboratorio abbiamo esordito con una rete in cui tutti i lati erano disposti uniformemente a caso. Poi la rete è stata ricablata, imitando la selezione naturale, per formare moduli separati e manifestare una proprietà nota nella scienza delle reti come *small-worldness* (mondo piccolo), in cui si formano vie che permettono a nodi di reti distanti di comunicare con sorprendente facilità. Poi migliaia di queste reti si sono evolute, e alla fine ciascuna conteneva hub che avevano stabilito forti connessioni con molti moduli, ma che erano anche strettamente interconnessi tra loro, formando un cosiddetto *club*. Nulla in questo processo ha selezionato esplicitamente un club di hub: sono scaturiti da questo processo iterativo.

La simulazione dimostra che una possibile soluzione per l'evoluzione di un cervello capace di scambiare informazioni tra moduli richiede hub con forti connessioni. In particolare, le reti reali – cervelli, aeroporti, reti elettriche – hanno anche hub durevoli e strettamente interconnessi, proprio come hanno predetto gli esperimenti evolutivi. Quella osservazione non implica che l'evoluzione sia avvenuta necessariamente come nella simulazione; rivela tuttavia un mezzo possibile mediante il quale potrebbe operare uno dei trucchi della natura.

Danielle S. Bassett e Matthew Cieslak University of Pennsylvania

Stati della mente

Quando il premio Nobel per la fisica Richard Feynman morì, nel 1988, sulla sua lavagna campeggiava ancora la frase «Ciò che non posso creare, non lo capisco». Aveva creato uno splendido aforisma, eppure gli era sfuggita un'idea essenziale, che andrebbe così riformulata: «Ciò che non posso creare *e controllare*, non lo capisco». Senza quel controllo, sappiamo comunque abbastanza cose per godere della sinfonia, anche se non possiamo dirigerla.

Quanto al nostro cervello, abbiamo una conoscenza di base della sua configurazione e della sua architettura di rete. Sappiamo che determina chi siamo, ma stiamo appena iniziando a capire come tutto questo accade. Riformulando la spiegazione di meccanica e determinismo del matematico Pierre-Simon de Laplace e applicandola all'organo della mente, il nostro cervello attuale, e quindi la nostra mente attuale, si può concepire come una compilazione di stati passati, utili per predire il futuro. Un neuroscienziato che conoscesse tutti i princìpi del funzionamento cerebrale e ogni cosa del cervello di una persona potrebbe predire le sue condizioni mentali: il futuro, come il passato, sarebbero presenti nella sua mente.

Questa conoscenza si potrebbe impiegare per prevenire il dolore e la sofferenza, dato che molte malattie mentali sono associate ad anomalie nella rete. Con sufficiente inventiva tecnologica, potremmo sviluppare dispositivi da impiantare che modificano, o che addirittura generano, nuove reti cerebrali o che elaborano i genomi per impedire fin dall'inizio che si manifestino le reti disorganizzate associate ai disturbi mentali. Un simile traguardo ci consentirebbe di trattare le malattie e di ristabilire la funzionalità cerebrale dopo un ictus o dopo una lesione, e di potenziarla negli individui normali.

Prima che si concretizzino questi scenari futuristici, devono essere colmate due grosse lacune: dobbiamo sapere di più su come la genetica, lo sviluppo nelle prime fasi della vita e l'ambiente determinano la nostra struttura cerebrale e come da tale struttura scaturiscono le capacità funzionali. I neuroscienziati hanno alcune conoscenze ricavate dal genoma umano sulla struttura che origina le reti funzionali, ma devono ancora imparare come avviene di preciso questo processo. Stiamo cominciando a capire come le reti cerebrali si sviluppano e sono plasmate dall'ambiente, ma siamo ancora lontani dallo spiegare l'intera complessità di questo processo. Il cablaggio del cervello, vale a dire la sua connettività strutturale, vincola il modo di interagire dei vari moduli, ma la nostra conoscenza rimane limitata. Quando colmeremo queste lacune, aumenterà la probabilità di intervenire per guidare il funzionamento cerebrale lungo traiettorie equilibrate.

A frenarci, per il momento, è la nostra visione ancora sfocata del cervello. È come se fossimo fuori dalla sala concerti e avessimo visto soltanto il disegno degli strumenti. All'interno di ogni regione cerebrale ci sono milioni di neuroni che si attivano ogni millisecondo, e noi siamo appena capaci di misurare indirettamente i loro livelli di attività media ogni secondo, più o meno. Per ora, sappiamo stimare a grandi linee le connessioni strutturali del cervello umano. Fortunamente gli scienziati e gli ingegneri hanno adottato le misure per trasmettere dati sempre più precisi, che permetteranno di guardare più in profondità nella rete forse più complessa dell'universo conosciuto: il vostro cervello. ■

PER APPROFONDIRE

Network Neuroscience. Bassett D.S. e Sporns O., in «Nature Neuroscience», Vol. 20, pp. 353-364, marzo 2017.

Graph Theory Methods: Applications in Brain Networks. Sporns O., in «Dialogues in Clinical Neuroscience», Vol. 20, n. 2, pp. 111-121, giugno 2018.

A Mechanistic Model of Connector Hubs, Modularity and Cognition. Bertolero M.A. e altri, in «Nature Human Behavior», Vol. 2, pp. 765-767, ottobre 2018.

Ambizioni artiche

Sono partite le grandi manovre per il controllo del fondo dell'Oceano Artico e per lo sfruttamento delle risorse dell'estremo nord, che si sta scongelando rapidamente a causa del riscaldamento globale

Alexander Ryumin/Getty Images

IN BREVE

Cinque paesi affacciati sull'Oceano Artico stanno rivendicando diritti su ampie porzioni, in parte sovrapposte, del fondo marino. Tre di essi sostengono che il Polo Nord sia loro. La diplomazia potrebbe lentamente arrivare a definire i confini in base alle prove geologiche; a meno che le crescenti tensioni geopolitiche non rendano irrilevante la scienza.

I paesaggi artici terrestri e marini stanno mutando in modo impressionante. La crescita delle temperature dell'aria e delle acque, il ritiro dei ghiacci e il disgelo del permafrost stanno causando l'espansione di ogni tipo di essere vivente – dalle alghe agli alberi, dai pesci ai caribù – in nuove aree, ne stanno cambiando i percorsi di migrazione e, in alcuni casi, ne minacciano la sopravvivenza.

La Russia espande la sua presenza militare nella regione e la NATO effettua grandi esercitazioni artiche: segnali che le ostilità potrebbero crescere. Ma il conflitto non è inevitabile: i paesi potrebbero decidere che hanno da guadagnare di più dallo sviluppo cooperativo di questa regione che sta cambiando.

Doppio impiego: il rompighiaccio russo *50 Let Pobedy* libera dai ghiacci una rotta commerciale. Ma è usato anche per portare turisti in località da poco interessate da fenomeni di disgelo. L'una e l'altra attività sono in crescita, ora che i paesi artici stanno accelerando lo sviluppo della regione.

STRAIT
NORWEGIAN

Condividere o conquistare

Cinque paesi rivendicano diritti su vaste porzioni, in parte sovrapposte, del fondo dell'Oceano Artico

di Mark Fischetti

Il 2 agosto 2007 tre esploratori russi pigiati nell'abitacolo di un batiscafo sono scesi nelle acque buie sotto la spessa coltre ghiacciata del Polo Nord fino al fondo marino, a 4300 metri di profondità. Lì, con il braccio meccanico dallo scafo, hanno piantato una bandiera nazionale in titanio nei sedimenti. Una volta tornato sul rompighiaccio a propulsione nucleare di supporto, il capo della spedizione e membro del Parlamento russo Artur Chilingarov ha dichiarato a un giornalista dell'agenzia di stampa russa ITAR-TASS a bordo della nave: «Se fra 100 o 1000 anni qualcuno scenderà dove siamo stati, vedrà la bandiera russa». Il presidente Vladimir Putin ha telefonato per congratularsi.

Mark Fischetti, *senior editor* di «Scientific American», si occupa del tema della sostenibilità in tutti i suoi aspetti.

Il geofisico canadese David Mosher al Bedford Institute of Oceanography, in Nuova Scozia, non è rimasto particolarmente colpito quando ha sentito la notizia. Lo scienziato ha dato un rapido sguardo a un piccolo cilindro di fango denso ed essiccato, grande più o meno come una salsiccia, poggiato su un vassoio di plastica nella sua libreria. Era un pezzo di una carota di sedimenti lunga 13 metri ed estratta dallo stesso fondo marino nel 1991, anno in cui Mosher era un dottorando alla Dalhousie University di Halifax. Si era avventurato laggiù con 40 scienziati di vari paesi a bordo di due rompighiaccio impiegati a scopo di ricerca, uno tedesco e uno svedese. Gli scienziati avevano fatto scendere un carotatore a pistone fino al fondo, perforato ed estratto una campione di sedimenti pesanti.

«Noi non abbiamo piantato bandiere», scherza Mosher. «Abbiamo preparato il buco per i russi».

La bandiera piantata sul fondo è stata una mossa politica mirata soprattutto a sollevare il morale dei russi, che stavano soffrendo una lunga recessione. Tuttavia questa pretesa così diretta sul Polo Nord ha fatto capire agli altri quattro Stati le cui coste si affacciano sull'Oceano Artico che era venuto il momento di rivendicare formalmente le porzioni del fondo artico a cui ritenevano di avere diritto.

Uno di questi paesi si era già mosso: un anno prima la Norvegia aveva presentato mappe e dati geologici in cui erano delineate tre porzioni del fondo marino alla Commissione sui limiti delle piattaforme continentali (CLCS), un organismo internazionale che esamina questo tipo di rivendicazioni e ne determina la correttezza scientifica. Il regno di Danimarca, che comprende la Groenlandia, ha impiegato diversi anni a mettere insieme un'enorme quantità di dati e nel 2014 ha inviato alla commissione una pila di documenti, asserendo di avere diritti su una vasta parte del fondo dell'Oceano Artico, per un'estensione di 900.000 chilometri quadrati. La Russia ha consegnato le sue carte nel 2015, rivendicando 1,3 milioni di chilometri quadrati – il doppio del Texas – che per più della metà si sovrappongono ai chilometri quadrati rivendicati dalla Danimarca.

Nel maggio scorso un gruppo canadese diretto da Mosher, oggi professore di geofisica all'Università del New Hampshire, ha sottoposto alla CLCS 2100 pagine di testo, coordinate e misurazioni da sonar a fascio multiplo, gravimetri e carotaggi, dichiarando che 1,1 milioni di chilometri quadrati del fondo fanno parte del Canada. La superficie si sovrappone in larga misura a quelle rivendicate da Russia e Danimarca. Gli Stati Uniti, il quinto paese costiero artico (grazie all'Alaska), non presenteranno la propria documentazione almeno fino al 2022, ma si pensa che vi sarà una sovrapposizione con l'area rivendicata dal Canada.

Per la massima parte della storia moderna, tutti paesi hanno visto nell'Oceano Artico solo una lastra di ghiaccio di scarsa utilità. Poi però il ghiaccio ha cominciato a sciogliersi, rivelando opportunità. Una ricerca del 2008 condotta dallo U.S. Geological Survey ha concluso che gli spessi sedimenti artici potrebbero contenere il 30 per cento del gas naturale ancora da scoprire nel mondo, e il 13 per cento del petrolio. E potrebbero esserci anche preziosi minerali di ferro e di terre rare. Il ritiro dei ghiacci implica inoltre la possibilità di aprire e sfruttare nuove rotte commerciali. Considerate queste ricche prospettive future, ognuno dei cinque paesi che si affacciano sull'Oceano Artico sta cercando di impadronirsi dell'area più vasta possibile. «Non si sa mai quello che può accadere», dice Flemming Getreuer Christiansen, vicedirettore del Servizio geologico di Danimarca e Groenlandia.

La CLCS potrebbe impiegare anni per esaminare i dossier trasmessi; lavora con lentezza, anche perché ci sono più di 80 casi aperti relativi a fondi oceanici in tutto il mondo, dal Nicaragua al Ghana, al Vietnam. Si ritiene che l'esame delle richieste della Danimarca o della Russia richiederà ancora diversi anni. E anni dopo queste si concluderà la revisione canadese. In più, la commissione non decide sulle aree contese, così, una volta esaminate tutte le documentazioni, i paesi dovranno intavolare trattative diplomatiche, mettendo sul tavolo le rispettive determinazioni della CLCS e negoziando le linee di confine: un altro passaggio che potrebbe richiedere parecchio tempo.

Il processo di mappatura e trasmissione delle rivendicazioni si svolge in maniera civile, e anzi in spirito di collaborazione, su solide basi scientifiche. Tuttavia la glaciale lentezza del processo causa parecchi problemi. Mentre gli scienziati esaminano metodicamente le rivendicazioni dei vari paesi, Putin sta ampliando le basi militari sulla costa artica della Russia. I suoi discorsi e le sue azio-

Illustrazione di Peter Horvath; Getty Images (*ghiaccio, pagine precedenti*)

Serbatoi per gas naturale liquefatto
in costruzione nel complesso Yamal LNG, finanziato in parte da Cina e Francia, presso il porto in via di espansione di Sabetta, sulla costa artica della Russia. I paesi affacciati sull'Oceano Artico sono sempre più impazienti di iniziare le esplorazioni per cercare gas e petrolio sotto il fondo oceanico, e anche vari paesi più lontani tengono d'occhio la possibilità di lucrose opportunità di investimento.

Kirill Kudriavtsev/Getty Images

ni hanno messo in chiaro che è convinto che il suo paese dovrebbe dominare la regione polare. Nel frattempo i paesi della NATO stanno rafforzando gli eserciti settentrionali, nel timore di un colpo di mano russo analogo all'annessione della Crimea del 2014. Anche la Cina sta inviando navi verso nord, segno che anche quel paese intende avere un ruolo.

Storicamente gli Stati Uniti si sono occupati poco della regione, ma adesso stanno facendo sentire il proprio peso. A maggio, il Segretario di Stato degli Stati Uniti Mike Pompeo si è presentato a una riunione del Consiglio Artico in Finlandia per dichiarare che la Russia si stava comportando in modo aggressivo e la Cina doveva essere tenuta d'occhio in modo attento. Per la prima volta in 23 anni, l'incontro si è chiuso senza la firma di una dichiarazione di cooperazione. Tutto questo atteggiamento può rendere conflittuali i negoziati sui confini, con le parti opposte che non tengono conto della scienza invece di fare compromessi basandosi su di essa. Peggio ancora, leader ostinati potrebbero semplicemente spazientirsi di fronte alle lungaggini della Commissione sui limiti delle piattaforme continentali e decidere di prendersi quello che credono sia loro.

La dorsale di Lomonosov

Per secoli gli Stati nazionali hanno visto gli oceani come zone selvagge. Nel Seicento cominciarono ad accampare diritti sulle prime 3 miglia (4,8 chilometri) dalla costa, la massima distanza di un colpo di cannone. Così è stato fino al XX secolo, quando vari paesi iniziarono a rivendicare unilateralmente diritti fino a varie distanze dalla costa, minando la tradizionale idea della libertà del mare aperto. Per risolvere la questione, nel 1982 oltre 160 paesi hanno aderito alla Convenzione delle Nazioni Unite sul diritto del mare (UNCLOS). In essa si stabilisce che ogni nazione affacciata su un oceano ha una zona economica esclusiva (ZEE) che si estende nel mare per 200 miglia nautiche (370,4 chilometri) dalla sua linea di costa, e in quell'area detiene tutti i diritti sulle risorse nell'acqua e sotto l'acqua. Al di là di quella linea ci sono le acque internazionali, proprietà di nessuno e aperte a tutti.

La convenzione ha lasciato una porta aperta. L'Articolo 76 dichiara che uno Stato può stabilire diritti sovrani sullo sfruttamento del fondo anche oltre le 200 miglia nautiche se è in grado di provare con dati geologici dettagliati che la sua piattaforma continentale – il fondo che digrada lentamente nell'oceano lontano dal-

la costa prima di sprofondare nel mare profondo – si estende oltre la linea delle 200 miglia nautiche. In questa zona, a un paese spetterebbero i diritti esclusivi sulle risorse sul fondo e sotto il fondo ma non sulla colonna d'acqua al di sopra di esso (che resterebbe aperta a pesca e navigazione). I paesi artici non hanno dato gran peso a questa disposizione fino a quando i ghiacci marini non hanno iniziato a ritirarsi.

L'Articolo 76 illustra le regole che gli Stati devono seguire nel delineare il bordo esterno della piattaforma continentale estesa che intendono rivendicare. Descrive due formule per tracciare le linee fino alla massima distanza permessa dai dati geologici. Poi descrive altre due formule che limitano quelle linee, così un paese non può rivendicare una porzione assurda di un oceano.

Entrambe le formule per delineare i confini si basano su un contorno chiamato «piede della scarpata». Immaginiamo di trovarci sulla costa e di guardare verso il mare. Il fondo marino scende gradualmente per parecchi chilometri, poi precipita in una ripida scarpata fino a fondali assai maggiori nella remota zona centrale dell'oceano. Lungo la base di questo pendio gli scienziati devono individuare il piede della scarpata – il punto di massimo cambiamento del gradiente – attorno alle linee di costa dei continenti e alle isole. Si tratta di produrre prove sul piede della scarpata: «La scienza è tutta qui», dice Mosher.

I cinque paesi artici si trovano lungo il bordo più o meno circolare dell'Oceano Artico. Le proiezioni delle relative piattaforme continentali dalle coste verso il centro sono destinate a sovrapporsi: le piattaforme terminano dove le ha fatte finire la tettonica delle placche.

Seguire le formule può portare a sovrapposizioni modeste, ma un'altra disposizione dell'Articolo 76 crea un problema più vasto. La disposizione afferma che un paese può rivendicare una larga fascia di fondo marino lungo un'elevazione sottomarina che si estenda a partire dalla sua piattaforma continentale, qualunque sia la distanza a cui arriva l'elevazione, di cui però non dà una definizione. La formulazione «è del tutto ambigua», dice Larry Mayer, che dirige il Center for Coastal and Oceanic Mapping dell'Università del New Hampshire. Mayer è considerato la massima autorità degli Stati Uniti sui fondali artici; caso vuole che per un decennio abbia insegnato alla Dalhousie, dove è stato il relatore di Mosher per il dottorato.

Questa ambiguità permette agli scienziati, e agli uffici legali dei ministeri, di interpretare i dati relativi alle elevazioni in modi diversi. Il singolo elemento che provoca la massima sovrapposizione fra Danimarca, Russia e Canada è la dorsale di Lomonosov. Si estende per 1800 chilometri dalle isole della Nuova Siberia, russe, fino all'isola di Ellesmere, in Canada – proprio vicino alla Groenlandia – dividendo a metà l'Oceano Artico. Alcuni suoi picchi si sollevano anche per 3500 metri dalle profondità oceaniche. Si tratta di una gigantesca reliquia risalente a milioni di anni fa, quando i continenti del Nord America e dell'Eurasia confinanti tra loro iniziarono a ruotare allontanandosi l'uno dall'altro, torcendo e deformando il fondo in espansione dell'Oceano Artico. La comune eredità della dorsale significa che Danimarca, Russia e Canada possono affermare che si estende naturalmente dalle rispettive piattaforme continentali e, quindi, che possono delimitare aree lungo di essa da reclamare come proprie. Il punto più notevole che ricade entro questi tracciati? Il Polo Nord.

Gli scienziati dicono che stanno solo illustrando dove li porta la geologia. Ma i gruppi che preparano il materiale da sottoporre alla CLCS posso comunque usare la scienza per servire alcune strategie nazionali. La Russia avrebbe potuto delineare la propria fascia seguendo la piattaforma continentale estesa lungo tutta la dorsale di Lomonosov attraverso il centro dell'Oceano Artico, arrivando fino al limite delle 200 miglia della ZEE del Canada, ma nei documenti presentati alla CLCS si è fermata subito dopo il Polo Nord. Il perché non viene detto. Due membri del suo gruppo di esperti che ho contattato, Eugene Petrov e Yuri Firsov, non hanno accettato di essere intervistati; il secondo mi ha scritto per e-mail che sono questioni «piuttosto complicate». Rick Saltus, ricercatore *senior* dell'Università del Colorado a Boulder, da tempo coinvolto nel lavoro degli Stati Uniti, dice che la Russia potrebbe non aver avuto abbastanza dati vicino all'estremità canadese della dorsale: produrre i dati richiesti dalla CLCS è costoso.

Oppure, dice, la Russia può essersi fermata lì per motivi strategici. Perché complicare i futuri negoziati sui confini con Danimarca e Canada? La lunga sezione della dorsale di Lomonosov che la Russia comunque ha incluso potrebbe essere più che sufficiente come regione da sfruttare.

Se saranno accolte le rivendicazioni dei cinque paesi artici, forse solo una piccola parte del fondo dell'Oceano Artico resterà aperta al resto del mondo, invece di considerare l'intera regione come bene comune globale

Il Canada ha scelto un approccio simile, seguendo la dorsale di Lomonosov dalle sue coste in poi e fermandosi subito dopo il Polo Nord e sovrapponendosi con la Russia in quella regione. La Danimarca invece rivendica la dorsale partendo dalla Groenlandia attraverso tutto l'oceano fino alla ZEE della Russia. «La possibilità che altri Stati possano avere rivendicazioni sulla stessa area non ci riguarda», ha detto lo scienziato che guida il gruppo danese, Finn Mørk, geofisico del Servizio geologico di Danimarca e Groenlandia. Tocca ai negoziatori, dice, risolvere le sovrapposizioni e decidere chi, alla fine, potrà sventolare la sua bandiera sul Polo Nord.

Politica o scienza?

Data la vaghezza dell'Articolo 76, le rivendicazioni sulla dorsale di Lomonosov potrebbero essere tutte legittime dal punto di vista scientifico. Ma quale paese finirà per assicurarsi i diritti su quale territorio non dipende dagli scienziati: dipende dai diplomatici o, potenzialmente, dai militari. E la crescita delle tensioni geopolitiche potrebbe prevalere sull'ordinato procedimento basato sulla scienza.

Innanzitutto, il dossier che sarà trasmesso dagli Stati Uniti alla CLCS aggiungerà altre sovrapposizioni, complicando i negoziati. L'estensione delle sovrapposizioni non sarà rivelata fino alla consegna dei documenti, che non avverrà prima del 2022, secondo Evan Bloom, direttore degli affari oceanici e polari del Department of State degli Stati Uniti e presidente del comitato esecutivo dello U.S. Extended Continental Shelf Project. Mayer sostiene che gli Stati Uniti hanno già tutti i dati necessari. «È solo che analizzarli è un lavoro enorme», spiega.

Tuttavia, la posizione diplomatica degli Stati Uniti potrebbe essere la più debole, perché il paese non ha mai firmato la conven-

Lo scioglimento delle calotte glaciali in regioni come le Svalbard (*nella foto*) e la Groenlandia sta liberando aree costiere che potrebbero essere sviluppate, mentre la ritirata del ghiaccio marino libera fondi marini e rotte navali commerciali che possono essere sfruttate per un periodo più lungo dell'anno.

Michael Nolan/Getty Images

zione UNCLOS, contrariamente agli altri quattro paesi artici. Tanti funzionari e parecchi presidenti degli Stati Uniti ne hanno raccomandato la firma, ma un piccolo numero di senatori diffidenti riguardo ai trattati ha sempre impedito la ratifica della convenzione. Ora questo potrebbe danneggiare la causa della loro nazione. «Vorrei che gli Stati Uniti si rendessero conto della posizione di svantaggio che hanno nel non essere tra le parti della convenzione», dice Galo Carrera, ricercatore alla Dalhousie University, console onorario del Messico in Canada ed ex presidente della CLCS.

Il risultato è che gli Stati Uniti non hanno alcun bisogno di trasmettere le proprie rivendicazioni alla CLCS o di attenersi alle sue revisioni. Ma Bloom dice che gli Stati Uniti faranno ugualmente entrambe le cose: hanno già speso 89 milioni di dollari per ottenere dati esaurienti. Vogliono che il resto del mondo veda che seguono gli stessi criteri degli altri. Questo dà loro «una posizione assai forte» nei futuri negoziati, dice Bloom. E non c'è altro modo di avanzare le proprie rivendicazioni. Il governo degli Stati Uniti potrebbe anche pubblicare un documento che dicesse «quest'area del fondo è nostra», ma il mondo non lo riconoscerebbe. In un negoziato sui confini, dice Saltus, ogni paese «avrà bisogno di avere in tasca una decisione della CLCS». In effetti, gli Stati Uniti riconoscono l'UNCLOS come diritto consuetudinario internazionale: la prassi giuridica che segue il mondo.

La retorica degli Stati Uniti sta rendendo ancora più complicata la situazione politica dell'Artide. In giugno il Department of Defense ha reso noto il suo ultimo documento strategico sulla regione, secondo cui, sebbene ci sia stato un buon grado di cooperazione fra i paesi artici, ora si prevede «un'epoca di competizione strategica» e una «potenziale via di aggressione.»

È possibile interpretare le azioni della Russia in questo senso. Fin dall'attacco russo all'Ucraina «i rapporti tra NATO e Russia sono tesi», dice Rob Huebert, professore di scienze politiche all'Università di Calgary, in Canada, ed ex direttore associato di quello che oggi è il Center for Military, Security and Strategic Studies della stessa università. La costa artica offre alla Russia una posizione strategica cruciale per le sue forze militari, in particolare per il deterrente nucleare, perché ospita basi importanti per i suoi sottomarini. «Non si può separare la politica della regione artica dalla più vasta geopolitica mondiale», dice Huebert, sostenendo che Putin «vede l'allargamento della NATO come una minaccia gravissima, e non permetterà che si verifichi». Dice che i jet russi ora ronzano attorno a Svezia e Finlandia perché questi due paesi stanno considerando la possibilità di aderire alla NATO. A marzo la Svezia ha ospitato una gigantesca esercitazione militare nella sua regione più settentrionale, con la partecipazione di migliaia di truppe della NATO. Nello stesso mese Curtis Scaparrotti, generale dell'Esercito degli Stati Uniti, ha detto a una commissione del Senato che, considerati i preparativi militari russi nell'Artide, anche le forze armate degli Stati Uniti devono fare di più nella stessa regione.

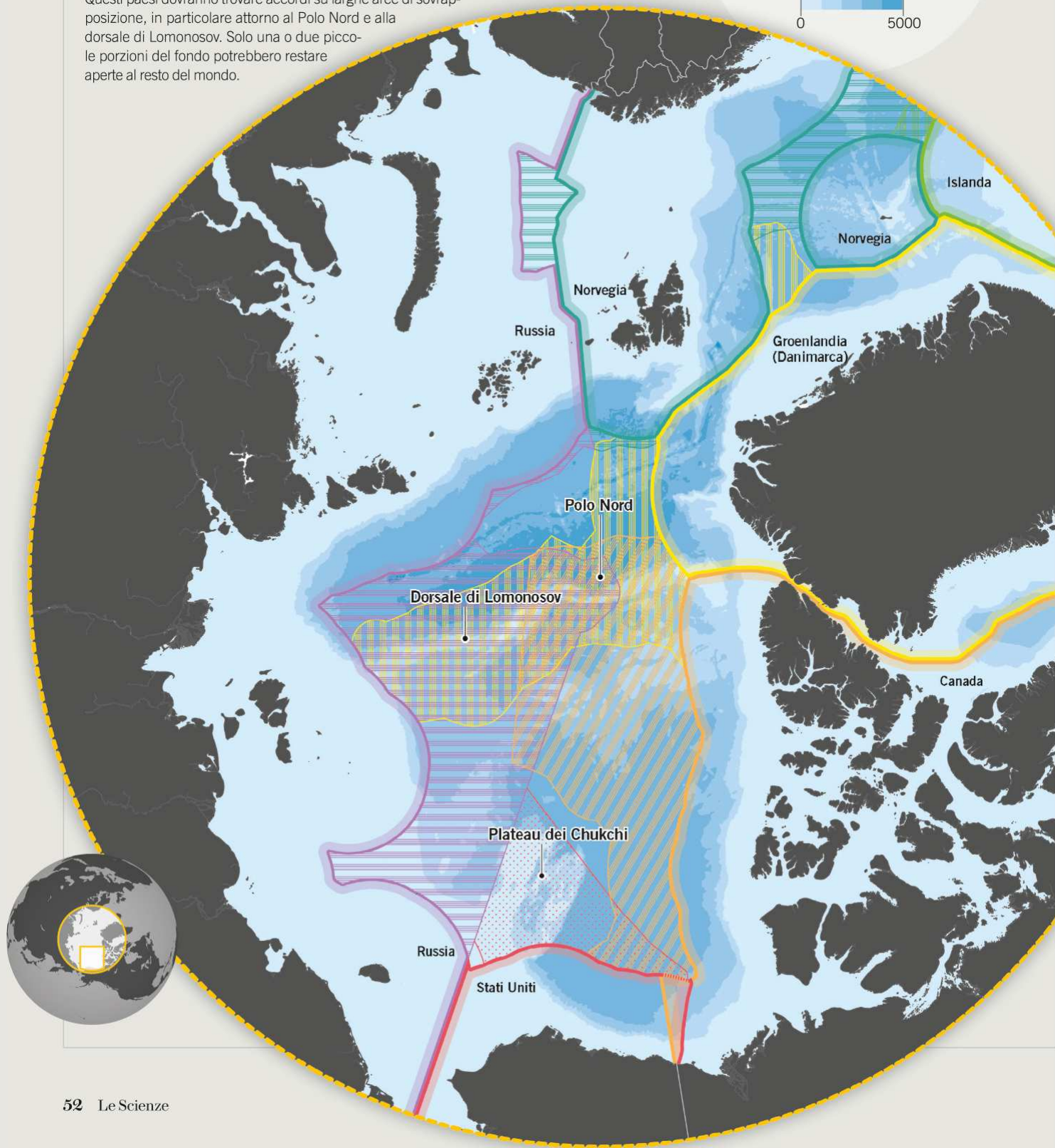
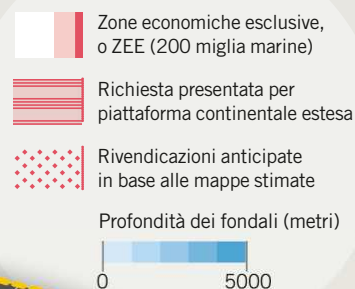
La Russia potrebbe avere anche un altro motivo, oltre a strategia militare, gas e petrolio, per voler controllare grosse porzioni dei mari artici. «Riguarda il nazionalismo: – dice Andrew Holland, CEO dell'organizzazione apartitica di ricerca American Security Project – Noi siamo i Russi, siamo la potenza artica, e ci spettano i diritti su tutto questo».

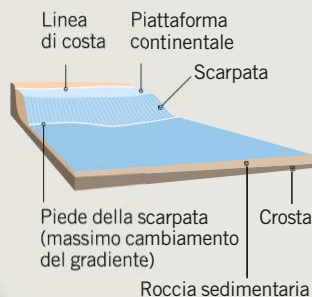
Altri esperti di geopolitica dicono che la potenzialità di un confronto sull'Artide è esagerata. Heather Exner-Pirot, *research fellow* al Center for Interuniversity Research on the International Rela-

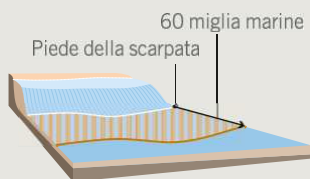
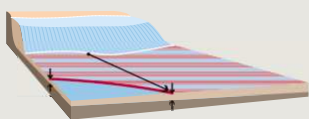
Definire i confini

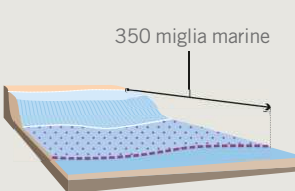
Mappe di Katie Peek, testo di Mark Fischetti

I cinque paesi costieri dell'Oceano Artico stanno presentando alla Commissione sui limiti della piattaforma continentale le proprie rivendicazioni sulla «piattaforma continentale estesa» – il fondo oceanico oltre le loro zone economiche esclusive – per ottenere i diritti sulle risorse presenti su e sotto il fondo. (Secondo la legislazione internazionale le acque restano aperte a tutti.)

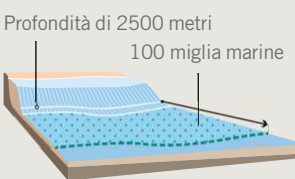
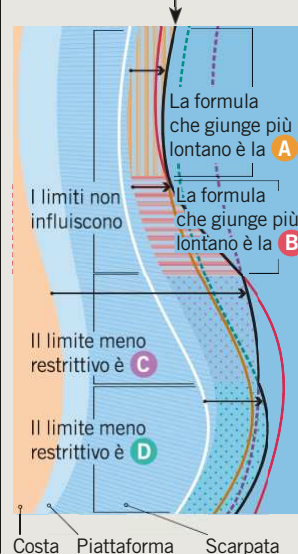
Questi paesi dovranno trovare accordi su larghe aree di sovrapposizione, in particolare attorno al Polo Nord e alla dorsale di Lomonosov. Solo una o due piccole porzioni del fondo potrebbero restare aperte al resto del mondo.

Come sono presentate le rivendicazioni

Un paese inoltra alla commissione i documenti in cui delinea l'orlo esterno della propria piattaforma continentale estesa, usando una delle due formule disponibili (A o B) per raggiungere la distanza più lontana permessa dalle formule, partendo dal piede della scarpata continentale. Quella linea è poi limitata dal più permissivo dei due limiti C e D.

Formule per delineare l'orlo esterno

A Una linea tracciata a 60 miglia marine dal piede della scarpata.

B Una linea dove lo spessore delle rocce sedimentarie è almeno pari all'uno per cento della minima distanza dal piede della scarpata.

Limiti dell'orlo esterno

C Una linea a 350 miglia marine dalla costa.

D Una linea a 100 miglia marine da una profondità della scarpata di 2500 metri.

Profondità di 2500 metri

100 miglia marine

Orlo finale esterno del margine continentale esteso

Il dilemma del Chukchi

La soluzione di rivendicazioni sul fondo marino richiede compromessi politici e scientifici.

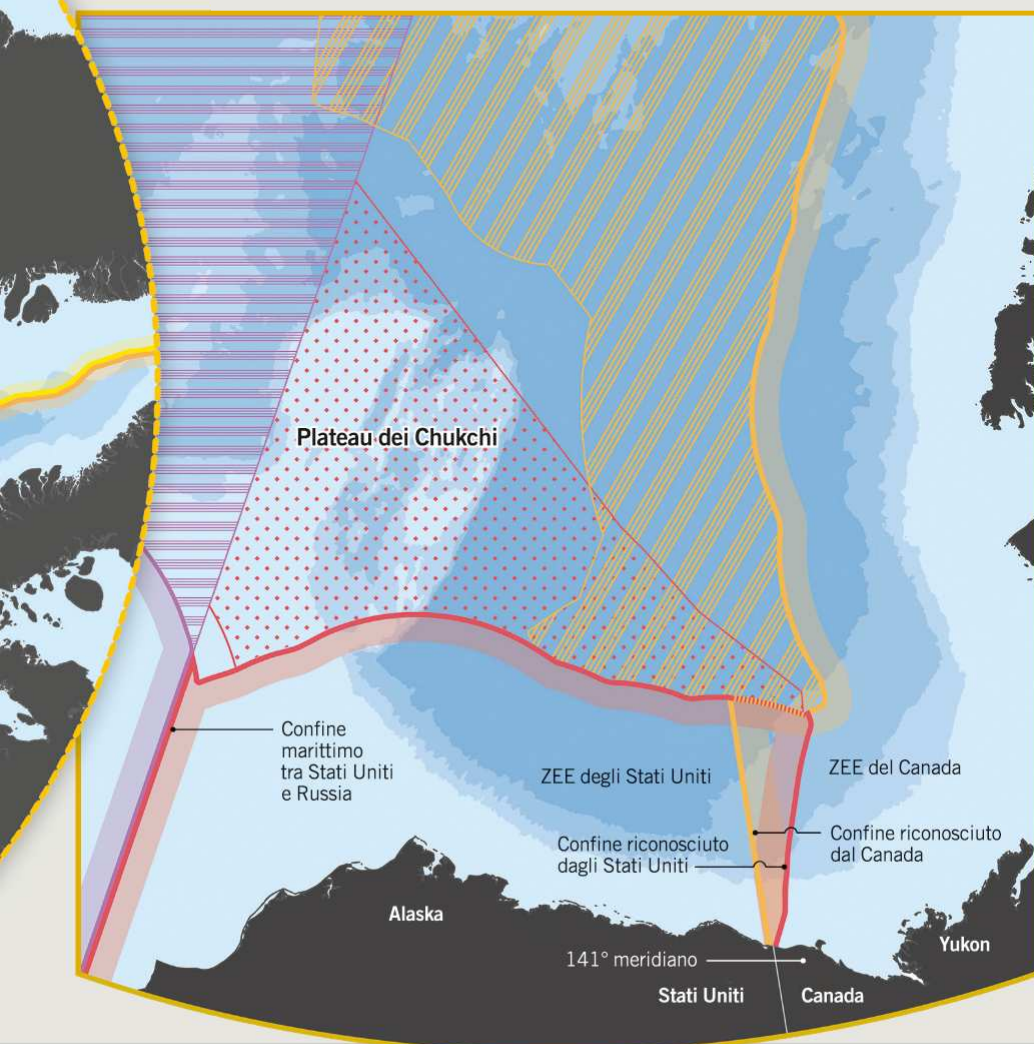
Un plateau flessibile

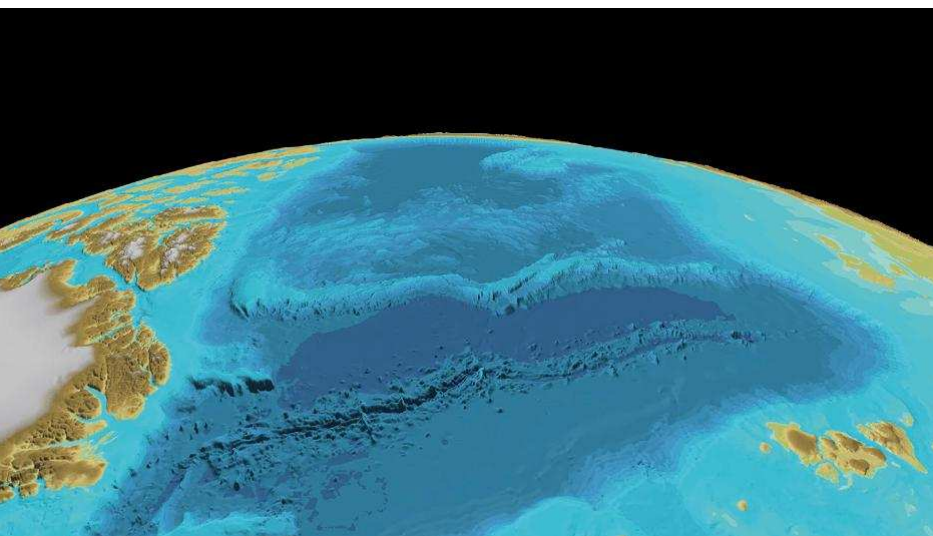
Russia e Stati Uniti potrebbero dire che il plateau dei Chukchi è un «naturale prolungamento» delle loro piattaforme, a seconda di come si interpreta la separazione tra i continenti nel corso di milioni di anni. Ma nel 1990 ex Unione Sovietica e Stati Uniti hanno negoziato un confine marittimo tra le loro zone economiche esclusive; nella richiesta di estensione della sua piattaforma continentale la Russia ha prolungato il confine senza attraversarlo. Gli Stati Uniti hanno dichiarato che rispetteranno il confine.

Uno stallo economico

Stati Uniti e Canada sono in disaccordo sul confine tra le ZEE. Il Canada prolunga il confine terrestre lungo il 141° meridiano (*in arancione*); gli Stati Uniti tracciano una linea equidistante dai tortuosi andamenti delle due coste (*in rosso*). Il fondo triangolare nel mezzo conterrebbe 1,7 miliardi di metri cubi di gas naturale.

Profondità del fondale (metri)

Fonti: IBRU, Università di Durham (*aree rivendicate*); Convenzione delle Nazioni Unite sul diritto del mare (*aree rivendicate*); marineregions.org (*ZEE*); Global Self-Consistent, Hierarchical, High-Resolution Geography Database (*linee di costa*); International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean, versione 3.0 (*profondità dei fondali*)

tions of Canada and Québec, e redattrice della pubblicazione *on line* annuale *Artic Yearbook*, che analizza la situazione politica artica, non è d'accordo con Huebert, già suo supervisore di dottorato. «Tanti pensano che nell'Artide ci sia una competizione», dice. «Ma in realtà c'è un oligopolio di cinque Stati che hanno un monopolio sull'Oceano Artico. E sono entusiasti di questo».

I cinque paesi artici hanno codificato la situazione nel 2008 con la dichiarazione di Ilulissat, un accordo secondo cui i cinque paesi collaboreranno fra loro per salvaguardare i traffici marittimi, prevenire sversamenti di petrolio e risolvere in modo pacifico i disaccordi. L'accordo dice anche che i cinque paesi bloccheranno ogni più vasto tentativo internazionale di governo dell'Artide, nonché ogni altro paese che dovesse presentarsi per tentare la ricerca di petrolio o gas senza permesso. Nessun altro paese, e nessuno dei popoli indigeni dell'Artide, è stato coinvolto.

La dorsale di Lomonosov (*banda più chiara al centro*) si estende sul fondo dell'Oceano Artico da Canada e Groenlandia (che fa parte della Danimarca) (*a sinistra*) verso la Russia (*a destra*). Tutti e tre gli Stati affermano di avere il diritto di sfruttarla perché fa parte del proprio continente sommerso.

Martin Jacobsson/Science Source

Se i litigi tra i cinque paesi artici non metteranno in discussione l'ordinata risoluzione delle rivendicazioni sul fondo dei mari, allora potrebbero farlo due fattori imprevisti. Il primo è nelle ambizioni economiche della Cina. Nel 2013 il presidente Xi Jinping ha svelato l'iniziativa della Nuova via della seta, che intende creare una rete economica tra numerosi paesi realizzando grandi infrastrutture. Oggi la Cina è a capo di molti progetti in oltre 60 paesi, per un valore di centinaia di miliardi di dollari. Alcuni leader mondiali temono che il vero intento della Cina sia porsi alla testa di un'enorme alleanza attraverso l'intera Asia. Dell'iniziativa fa parte la cosiddetta Via della seta polare, concepita per sviluppare le rotte commerciali marittime per la Cina attraverso l'Artide e i rapporti d'affari con i paesi lungo le rotte. Nel 2017 Xi ha tenuto vertici con i leader dei paesi artici, uno alla volta. Per non essere da meno Putin, che ha una propria visione eurasiatica, ha incontrato separatamente i leader di Finlandia, Svezia, Norvegia e Islanda al quinto Forum artico tenutosi lo scorso aprile a San Pietroburgo.

La seconda protagonista imprevista è la Groenlandia, che dal 1953 è un territorio della Danimarca. Sebbene nel 2009 la Danimarca abbia concesso l'auto-governo alla Groenlandia, le elezioni politiche tenutesi in Groenlandia nel 2018 sono state un referendum a sostegno della piena indipendenza. Quello che ha impedito la secessione è che i quasi 60.000 abitanti sparsi sull'isola più vasta del mondo dipendono pesantemente dalla Danimarca per sussidi e forze armate. Ma con il ritiro di nevi e ghiacci la Cina sta investendo in attività minerarie nel territorio, e lo stesso stanno facendo altri paesi, fra cui gli Stati Uniti. Gli abitanti della Groenlandia cominciano a pensare di poter fare da soli. La Danimarca ha già conferito alla Groenlandia i diritti sulle risorse dei fondali nella ZEE attorno all'isola.

Una Groenlandia indipendente potrebbe aderire alla NATO; gli Stati Uniti hanno già una grossa base aerea nel paese. O potrebbe unirsi con un partner come la Cina, o anche la Russia, per portare sviluppo nei territori in via di disgelo. Se la Groenlandia diventerà uno Stato indipendente, la Danimarca potrebbe cederle le sue pretese sulla piattaforma continentale estesa a partire dalle lunghe coste dell'isola. In quel caso i negoziati sulla piattaforma continentale potrebbero dover ricominciare con un governo della Groenlandia, con ulteriori potenziali ritardi.

Finale di partita

Anche se gli scienziati dei cinque paesi artici non vogliono dire ufficialmente granché sui futuri negoziati riguardo a confini e zone di sovrapposizione, alcuni di loro sembrano sentirsi a disagio con i tempi del procedimento della CLCS. Nove di essi – fra i quali Mosher, per il Canada, Mayer e Saltus, degli Stati Uniti, Mørk, della Danimarca, e i russi Petrov e Firsov – lavorano per stabilire una base comune delle scarpate continentali di tutto l'Oceano Artico, e stanno preparando una pubblicazione per una rivista soggetta a *peer review*. Ciò equivarrebbe a dichiarare che tutti i paesi hanno calcolato la propria base della scarpata – il punto di partenza delle formule – secondo gli stessi parametri. Di fronte a un simile accordo, è possibile che la CLCS acceleri i lavori.

Se la CLCS approverà la documentazione dei cinque paesi artici così com'è, solo una piccola parte del fondo artico potrebbe restare libera da rivendicazioni: due lotti modesti in alto mare. Ma il resto del mondo potrebbe non essere contento del risultato. A volte i paesi artici pensano che l'Oceano Artico sia il proprio cortile di casa, spiega Carrera, ma molti altri paesi, come pure i popoli indigeni, vedono in esso un bene comune globale. Ritengono di avere il diritto di esplorarne le risorse e di condurvi ricerche.

Qualcuno di essi pensa che il mondo dovrebbe formalmente stabilire la natura di bene comune dell'Oceano Artico e cita come modello il Trattato Antartico. In vigore dal 1961, riserva tutte le terre e le piattaforme di ghiaccio alle attività scientifiche e vieta ogni attività militare, proteggendo inoltre oltre 20 milioni di chilometri quadrati dell'Oceano Antartico attorno al continente. Ma in Antartide non vive nessuno. Non ci sono Stati costieri, ed è più remota e più ghiacciata. Sappiamo poco delle sue risorse e non offre vantaggi strategici. Con il riscaldamento dell'Artide, invece, quella che un tempo era la casa solitaria di popoli indigeni, che vivevano della sua natura selvaggia anziché cercare di domarla, sarà divisa in più parti e sviluppata come il resto del mondo più a sud. Che sia la scienza o la politica a guidarlo, il processo è già in corso. ■

Una nuova realtà

Il cambiamento climatico sta sconvolgendo la vita nell'estremo nord

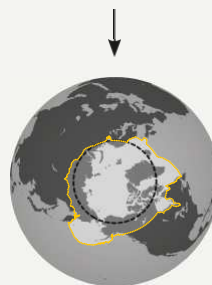
di *Mark Fischetti*

Sull'isola di Banks, nei Territori del Nord-Ovest canadesi, oltre 4000 frane stanno scivolando al rallentatore lungo i pendii via via che il permafrost in fase di scongelamento crolla e si sbriciola. In Siberia, il riscaldamento globale sta forzando il metano intrappolato nel terreno a risalire verso la superficie ed esplodere, lasciando crateri larghi anche 40 metri.

In tutto l'Artide, i cambiamenti impressionanti sono la nuova normalità, come le incursioni di Stati e aziende. Edilizia, estrazione di petrolio e gas naturale, navigazione e turismo sono tutti in ascesa. Clima e attività umane stanno lasciando segni sulla natura e sui 4 milioni di persone che vivono nella regione.

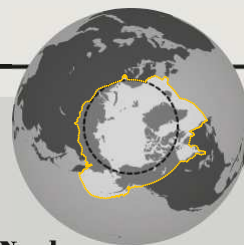
Con l'ampliarsi delle interazioni, la scienza sarà importante per fornire informazioni utili ad accordi e normative, riguardanti soprattutto preparazione a fronteggiare i disastri, protezione dell'ambiente, opportunità economiche, sicurezza alimentare, salute umana e resilienza delle comunità. I popoli indigeni potrebbero essere tra gli esperti più preziosi. Per anni hanno tenuto traccia da vicino del mutare delle temperature e del ritiro delle coperture glaciali, hanno percorso montagne e foreste, seguito branchi di caribù, catturato pesci e mantenuto la biodiversità. Le loro comunità e culture, poi, sono le più colpite dagli sviluppi in arrivo.

Alcuni leader indigeni dicono che l'Artide dovrebbe essere governata da organizzazioni cooperative con regole che trascendano i confini politici. Per esempio una pianificazione territoriale delle vaste distese terrestri e marine potrebbe definire diritti dei popoli, protezione dell'ambiente e mezzi con cui condurre un dialogo costruttivo. In ultima analisi, affermano, l'uso sostenibile di quella che sarà l'Artide in futuro dipende dalla salute dell'ambiente e dal buon assetto della comunità. ■

UN TERRITORIO CHE CAMBIA

Christoph Wagner/Getty Images (*renna*); Getty Images (*neve*)

Un territorio che cambia

Mappe di Katie Peek, testo di Mark Fischetti

Gli scienziati non sanno più come descrivere il cambiamento dei paesaggi terrestri e marini delle regioni artiche. Gli effetti sono peggiorati da fattori fisici come l'aumento delle temperature di aria e acqua, insieme alla scomparsa di neve e ghiaccio marino. Il risultato è che gli organismi viventi, dalle alghe agli alberi ai caribù, prosperano, sono difficoltà o si spostano; ogni anello della catena alimentare deve adattarsi. L'impatto più grave potrebbe essere provocato dallo scioglimento del permafrost, che rilascerebbe una quantità di gas serra sufficiente a raddoppiare il riscaldamento globale attuale.

Il Polo Nord

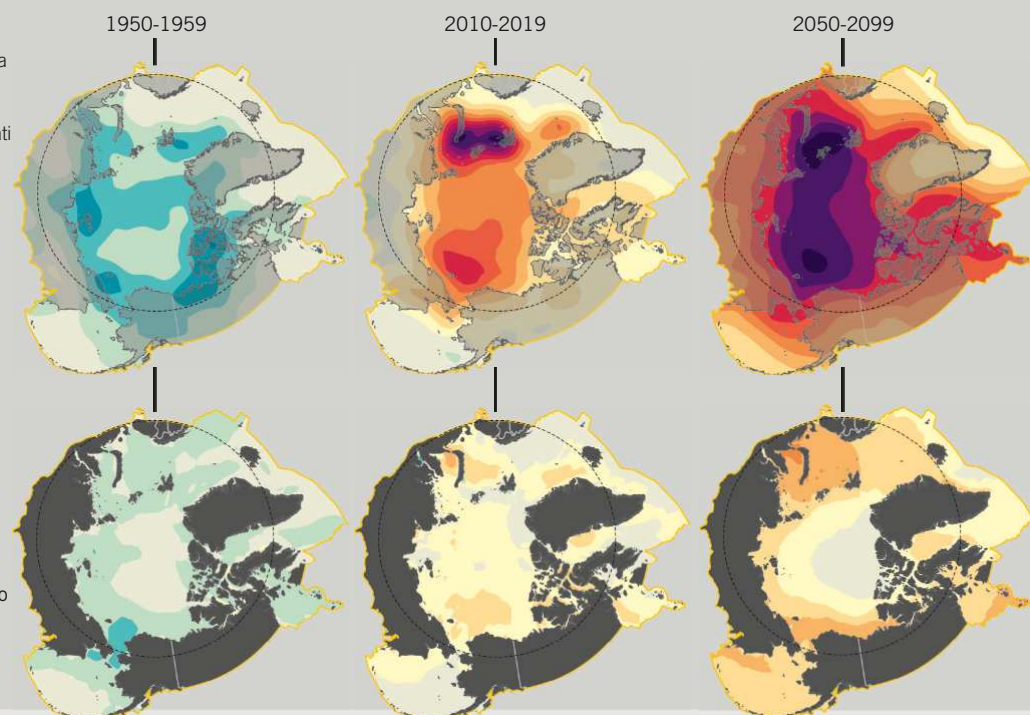
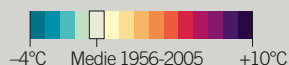
L'«Artide» ha diverse definizioni. Le mappe illustrate di seguito seguono quella dell'Arctic Council, o Consiglio Artico, un forum intergovernativo.

Cambiamenti fisici

Aria, mare e terraferma sono in rapida trasformazione. Ogni caratteristica è mappata relativamente all'intervallo temporale più lungo su cui ci sono dati completi.

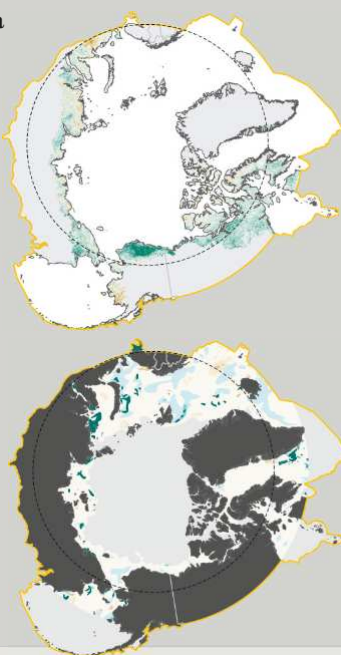
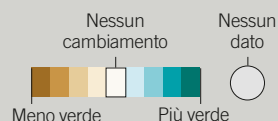
Un'aria più calda
Negli ultimi anni, dal 2010, le temperature invernali medie dell'aria alla superficie sono state molto più alte che negli anni cinquanta del Novecento. Secondo le proiezioni a medio termine, la seconda metà di questo secolo sarà ancora più calda.

Un oceano più tiepido
Le temperature superficiali estive dell'acqua sono aumentate parecchio; si prevede che continueranno a crescere.

Anomalia della temperatura rispetto alle medie del 1956-2005:

La risposta della natura

Tutte le forme di vita si stanno adattando ai cambiamenti.

Una tundra più verde
Sulla base della copertura vegetativa, le immagini satellitari del 2017 mostrano porzioni di terraferma molto più verdi o marroni rispetto al 1982.

Alghe in aumento
Mari più caldi e meno ghiacciati consentono al fitoplancton di prosperare. Nell'estate del 2017 la sua estensione, vista in verde dai satelliti, era molto maggiore rispetto al 2003.

Castoro americano

L'effetto castoro

Quando gli alberi si spostano a nord, i castori li seguono e li abbattono per costruire dighe, causando allagamenti locali che fanno sciogliere il permafrost, con un conseguente rilascio di anidride carbonica e metano. I gas contribuiscono al riscaldamento globale e gli alberi si spostano ancora più a nord. Arrivano altri castori, innalzano altre dighe, si scioglie altro permafrost e il riscaldamento continua ad aumentare.

Meno ghiaccio nel mare
Ogni settembre il ghiaccio marino si riduce al minimo, ma ora annualmente ne scompare molto di più. Nel decennio 1850-1859, l'anno mediano è stato il 1855 (sulla base di dati registrati da mappe, naviganti ed esploratori); nell'ultimo decennio, l'anno mediano è stato il 2010.
Estensione dei ghiacci a settembre
Ghiaccio marino esistente
1855
2010
Meno neve
Il numero di settimane con copertura nevosa è diminuito in modo significativo dall'inverno 1972-1973 (mediano del decennio 1970-1979) a quello del 2008-2009 (mediano degli ultimi 11 anni).
Settimane con manto nevoso
20
50+
1970-1979
2010-2019
Un permafrost più soffice
Il suolo che una volta era congelato per tutto l'anno o quasi (permafrost) si sta scongelando. In alcuni luoghi il processo è lento, in altri più veloce.
Oggi
Tipi di permafrost
Tutto l'anno
Discontinuo, o si scioglie d'estate
Ricopre meno di un terzo dell'area
Scioglimento rapido
La biomassa nel Mare di Barents
4 milioni di tonnellate
2
Merluzzo atlantico
Merluzzo polare
2004
2015
Areale dei pesci
Merluzzo atlantico
Merluzzo polare
Popolazione locale
In aumento
In diminuzione
Stabile
Sconosciuta
I pesci migrano
Il merluzzo polare è in declino perché ha bisogno del ghiaccio per riprodursi. Con il riscaldamento degli oceani, il merluzzo nordico in arrivo da sud lo sta sostituendo.
Gli uccelli cambiano
Le urie di Brünnich fanno il nido in vaste colonie costiere e sono una preda importante per gli esseri umani e altri animali. Il loro numero sta aumentando in certi luoghi e diminuendo in altri.
Gli orsi polari muoiono
Gli orsi polari in difficoltà sono l'icona dello scioglimento dell'Artide. La loro scomparsa è diffusa.
I caribù oscillano
Sono state seguite 23 mandrie di caribù: 16 sono in diminuzione, cinque in aumento e due sono stabili.
Morgan Trimble/Getty Images (castoro); Adrian Wojcik/Getty Images (Svalbard). Fonti: NOAA's Earth System Resarch Laboratory (temperature aria e mare); U.S. National Snow e Ice Data Center (banchisa); NOAA'S National Centers for Environmental Information (neve); Merritt R. Turetsky/Università di Guelph (permafrost); Uma S. Bhatt/Università dell'Alaska a Fairbanks (tundra); Karen E. Frey/Clark University (produttività primaria); FAO (habitat merluzzi); State of the Arctic Marine Biodiversity Report, Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF), 2017 (abbondanze merluzzi); Birdlife International, 2018 (urie); Arctic Biodiversity Assessment 2013. CAFF, Arctic Council, 2013 (tendenze urie, orsi polari, renne e caribù).
Riflettori sulle Svalbard
Le Svalbard, isole norvegesi, stanno cambiando a velocità vertiginosa. Gli inverni sono più caldi di 7 gradi e più corti di due mesi rispetto al 1971. La pioggia, un tempo rara, oggi allaga di continuo il suolo e provoca smottamenti, facendo sprofondare gli edifici. La pioggia può anche congelare muschi e licheni, costringendo le renne a mangiare le meno nutrienti alghe kelp trascinate a riva su coste meno ghiacciate. Nell'entroterra, il Global Seed Vault, un tempo sepolto nel terreno congelato, sta perdendo il suo refrigerante naturale.
Longyearbyen, nelle Svalbard

La tensione politica è in aumento, ma la collaborazione potrebbe ancora prevalere

Uno scontro inevitabile?

di Kathrin Stephen

Il 28 marzo, cinque bombardieri statunitensi B-52 erano in missione di addestramento sopra il Mare di Norvegia, nell'Oceano Artico. Erano in volo anche caccia norvegesi F-16, parte di un'esercitazione congiunta della NATO che coinvolgeva 10.000 truppe nel nord della Svezia. All'improvviso, due bombardieri russi Tu-160 hanno attraversato lo stesso spazio aereo. Presa di sorpresa, la Norvegia ha inviato gli F-16 all'inseguimento degli intrusi. I Tu-160 hanno continuato in direzione del Regno Unito, poi hanno invertito la rotta e sono tornati a casa, ma la loro comparsa è stata preoccupante. I bombardieri della Russia e quelli degli Stati Uniti possono trasportare armi nucleari, e meno di due mesi prima entrambi avevano annunciato il ritiro dal trattato Intermediate-range Nuclear Forces, perché non erano più interessati a seguirne le regole. Gli aerei norvegesi e statunitensi non erano entrati nello spazio aereo russo, ma era possibile che i russi avessero interpretato l'esercitazione come un segnale della NATO di poter far arrivare armi nucleari vicino al confine russo. Forse i militari russi avevano ritenuto necessario ricordare alla NATO che anche loro hanno una grande potenza aerea.

È ragionevole guardare a quello che avviene nell'Artide e preoccuparsi della crescita delle tensioni. Un accesso reso più facile dal riscaldamento globale ha portato la regione molto in alto nell'elenco delle priorità degli otto Stati con terre o acque territoriali a nord del Circolo polare artico: Russia, Finlandia, Svezia, Norvegia, Islanda, Danimarca (con la Groenlandia), Canada e Stati Uniti. Altri soggetti influenti come Regno Unito, Giappone e Cina prestano grande attenzione ai nuovi vantaggi offerti dallo scongelamento dell'Oceano Artico. Secondo lo U.S. Geological Survey, l'Artide potrebbe contenere fino al 13 per cento del petrolio e il 30 per cento del gas naturale mondiali ancora da scoprire. I governi tengono d'occhio anche le rotte commerciali sempre più libere dai ghiacci tra il Passaggio a nord-est lungo le coste russe e il Passaggio a nord-ovest che costeggia il Canada, senza contare le aree di pesca potenzialmente enormi.

Su questi fattori svetta l'apparente desiderio della Russia di dominare la regione. Sotto la direzione del presidente Vladimir Putin, il paese ha fatto enormi investimenti per riaprire basi e porti militari nell'Artide, dove sta installando un sistema di allerta precoce per missili. La Russia sta anche espandendo la propria flotta di rompighiaccio per assicurarsi di poter operare nei mari artici tutto l'anno. La prima delle sue nuove, muscolose navi rompighiaccio LK-60 a propulsione nucleare, *Ural*, è stata varata a maggio 2019.

Le altre nazioni non restano con le mani in mano. Di recente, il Regno Unito ha an-

nunciato una nuova strategia difensiva per l'Artide; sempre nel 2019, a febbraio, il Parlamento degli Stati Uniti ha stanziato 675 milioni di dollari per una potente rompighiaccio polare e a marzo la Marina Militare ha annunciato che in estate avrebbe inviato nell'Oceano Artico numerose navi. Ad aprile la Guardia costiera ha reso pubblica una strategia per le regioni artiche che richiederà maggiori investimenti. Il mese successivo, nell'incontro ministeriale dell'Arctic Council, lo statunitense Mike Pompeo ha criticato il comportamento aggressivo di Russia e Cina nella zona. Queste azioni potrebbero riflettere un potenziale cambiamento nelle linee di condotta, a favore di una maggior risolutezza nel bilanciamento dell'influenza russa. Il segretario di Stato Pompeo ha addirittura esaltato l'azione unilaterale invece della collaborazione.

Da un punto di vista strategico, l'Artide ha un'importanza enorme per la Russia e i suoi rivali. Il deterrente nucleare russo è legato ai sottomarini nucleari, e le loro basi principali sono sulla costa artica. La recente attività ha fatto temere che un'Artide più accessibile possa portare la regione a una guerra fredda. Nel 2014 la Russia ha annesso la penisola della Crimea, e da allora i rapporti con la NATO sono tesi; la preoccupazione è che entrambe le parti possano usare il territorio artico come moneta di scambio in negoziati che coinvolgono altre regioni problematiche come Siria o Ucraina. A marzo la Russia ha annunciato che avrebbe reso più severi i requisiti per le navi straniere sulla rotta del Mare del Nord.

A complicare le cose, quattro dei cinque paesi che si affacciano sull'Oceano Artico hanno presentato alle Nazioni Unite, sotto la Convenzione delle Nazioni Unite sul diritto del mare (UNCLOS), rivendicazioni per lo sfruttamento della piattaforma continentale estesa: il fondo marino che si spinge lontano nell'oceano. Ci sono grandi aree di sovrapposizione, in particolare fra Russia, Danimarca e Canada. La Russia ha seguito le procedure della UNCLOS perché ha molto da guadagnarci, considerata la sua lunga costa artica e la scarsa profondità della sua piattaforma continentale. Se però le nazioni artiche non riuscissero a risolvere politicamente queste sovrapposizioni, la Russia potrebbe anche non giocare pulito e avere la sua forza militare in Artide pronta all'azione.

Non è come sembra

Ma il conflitto non è inevitabile. Gli Stati artici hanno ottime ragioni per collaborare, e alcune mosse potrebbero non essere aggressive come sembrano. Per esempio, nell'Artide le condizioni sono così dure che molti compiti civili, come le esplorazioni per il petrolio o il controllo del traffico navale, possono essere eseguiti solo con personale ed equipaggiamenti militari.

I russi sono consapevoli che un conflitto aperto potrebbe precludere per sempre lo sfruttamento di petrolio e gas artici, perché è un lavoro che dipende da partner internazionali, compresi Stati e aziende occidentali. Anche quando i mari sono liberi dai ghiacci, l'attività estrattiva è costosa e tecnicamente difficile. L'impianto russo per la liquefazione di gas naturale Yamal LNG, vicino alla costa, è costato 27 miliardi di dollari. La Russia era restia a finanziarlo da sola, così ha reclutato partner francesi e cinesi.

La dipendenza del paese da finanziamenti e competenze tecniche esterni incentiva moderazione, soprattutto in aree in cui le rivendicazioni del fondo marino si sovrappongono. Russia e Norvegia, i due Stati artici con la posta in gioco più alta per le risorse *offshore*, devono costruire un clima stabile per attirare investimenti esterni. Le due nazioni intendevano farlo nel 2010, quando dopo uno stallo durato molti anni hanno risolto la disputa sui confini nel Mare di Barents nel giro di qualche settimana.

La politologa **Kathrin Stephen** dirige un gruppo di ricerca all'Institute for Advanced Sustainability Studies a Potsdam, in Germania. È anche *senior fellow* e direttrice editoriale all'Arctic Institute - Center for Circumpolar Security Studies a Washington.

Petrolio e gas potrebbero anche non essere materia di discussione. Solo Russia e Norvegia hanno un interesse significativo nello sfruttamento di queste risorse, perché costituiscono una parte sostanziale dei proventi delle loro esportazioni. Stati Uniti e Canada hanno giacimenti di combustibili fossili molto più grandi e accessibili in aree non artiche: per esempio, il petrolio nel Golfo del Messico e il gas da scisti bituminosi in molti Stati degli Stati Uniti e nelle sabbie bituminose in Alberta, una provincia canadese.

La stragrande maggioranza delle risorse petrolifere previste, inoltre, si trova nelle zone economiche esclusive (ZEE) delle cinque nazioni con coste artiche. Le ZEE si estendono fino a 200 miglia nautiche dalle coste (370,4 chilometri) e, secondo la UNCLOS, ogni paese controlla le risorse della propria ZEE. Ovviamente ci si aspetta che alcuni giacimenti di petrolio e gas si trovino più lontano dalle coste, nella piattaforma continentale estesa dove le rivendicazioni territoriali si sovrappongono; ma dal momento che le regole della UNCLOS assegnerebbero alla Russia zone piuttosto ampie, non c'è ragione di pensare che i suoi leader vogliano silurare una soluzione pacifica al problema delle sovrapposizioni.

Soprattutto, per essere sviluppate, le risorse dell'Artide devono essere redditizie. Il petrolio a 80 dollari al barile, prezzo che non si vede dall'ottobre 2014, potrebbe giustificare estrazioni offshore, ma non molto lontane dalla costa, cioè nella piattaforma continentale estesa. Il destino del giacimento di Shtokman, nella ZEE russa nel Mare di Barents, è un esempio significativo. Scoperto nel 1988, è uno dei giacimenti più grandi al mondo, e secondo le stime contiene 3800 miliardi di metri cubi di gas. All'inizio degli anni duemila Putin ha dichiarato che la Russia lo avrebbe sfruttato ma, con la rivoluzione dei gas da scisti negli Stati Uniti e il surplus di gas nel mercato durante il 2010, il progetto è stato archiviato. Nella regione artica, le rivendicazioni territoriali che vanno oltre le ZEE sono soprattutto simboliche. Si tratta di assicurarsi l'accesso alle risorse più lontane nel caso in cui un giorno acquistino valore, non di «fare a gara» per sfruttare le risorse prima degli altri.

Anche un attacco legato alle rotte navali sembra improbabile. Nonostante il fascino, gli spedizionieri non considerano i passaggi a nord-ovest e a nord-est competitivi rispetto alle rotte commerciali globali che attraversano i canali di Suez e di Panama, anche se queste ultime sono più lunghe. La natura stagionale dei corridoi artici (il ghiaccio invernale durerà ancora per anni), insieme al clima rigido e alle infrastrutture insufficienti per rispettare le tabelle di marcia, riducono considerevolmente l'importanza delle rotte artiche per il commercio marittimo internazionale.

Nel settembre 2018 una portacontainer della società danese Maersk ha completato il primo transito lungo la rotta del Mare del Nord; ma è stata una prova, non l'apertura di una rotta commerciale. Il responsabile tecnico di Maersk ha dichiarato: «Al momento, non riteniamo la rotta del Mare del Nord una valida alternativa commerciale alle rotte est-ovest già esistenti». Il traffico navale nella regione artica potrebbe essere utile per spedire i materiali per il nuovo porto russo di Sabetta e per il trasporto di gas naturale liquefatto dalla penisola di Yamal, soprattutto nei mesi estivi; queste

Pagine precedenti: illustrazione di Peter Horvath; Getty Images (*bandiere, carri armati, ghiaccio e acqua*)

ANTROPOLOGIA

Gli umani del nord

Dei 4 milioni di residenti della zona artica, circa 500.000 sono indigeni. Si sono organizzati in sei gruppi regionali che partecipano al forum collaborativo dell'Arctic Council insieme a otto Stati membri. L'Associazione russa delle popolazioni indigene del nord è il gruppo regionale più numeroso e rappresenta 244.000 individui.

Fonte: P. Rekacewicz UNEP/GRID-ARENDAL

attività, però, coinvolgono prevalentemente navi russe e non hanno nulla a che fare con il commercio marittimo internazionale.

Molti paesi e aziende hanno sperato di avventurarsi nell'Artide per catturare più pesci, dato che specie importanti stanno migrando verso nord. Ma i profitti sono incerti. Nel 2009 gli Stati Uniti hanno chiuso alla pesca commerciale grandi aree della ZEE al largo delle coste dell'Alaska, tra il Mare dei Ciukci e il Mare di Beaufort, per mancanza di dati sulla sua sostenibilità. Nel 2015 le cinque nazioni che si affacciano sull'Oceano Artico hanno messo in atto una moratoria di fatto sulla pesca commerciale in mare aperto (oltre le proprie ZEE). Poi, nel 2018, hanno firmato un divieto che impedirà la pesca commerciale in quest'area per 16 anni; l'accordo è stato sottoscritto anche da Islanda, Unione Europea, Cina, Giappone e Corea del Sud. L'obiettivo principale è ricavare il tempo necessario per ottenere dati scientifici accurati sulle zone di pesca e progettarne un uso commerciale sostenibile e ragionato.

La forza della collaborazione

Nel valutare le probabilità di un futuro conflitto, è importante ricordare che l'Artide è stata storicamente un luogo di collaborazione internazionale: le nazioni artiche, alcuni altri paesi non artici e i rappresentanti delle comunità indigene locali hanno lavorato insieme in modo pacifico per lunghi anni. Nel 1991 gli otto Stati con territori a nord del Circolo Polare Artico e le popolazioni indigene hanno adottato l'Arctic Environmental Protection Strategy, che promuove la collaborazione nel monitoraggio e nella conservazione del territorio. L'accordo ha portato nel 1996 alla nascita dell'Arctic Council, che è diventato il forum centrale della regione e ha sempre generato iniziative e decisioni collaborative e di successo. Oggi l'Arctic Council include anche organizzazioni non governative, enti scientifici e associazioni per le Nazioni Unite e nel 2018 è stato candidato al premio Nobel per la pace.

L'Arctic Council è stato criticato per non aver affrontato le questioni militari e il problema della sicurezza, che però sono esclusi dal suo mandato. Sul fronte della sicurezza sono necessari canali diplomatici, ma l'Arctic Council non è il posto adatto. Gli Stati hanno di questi canali, per esempio l'Arctic Security Forces Roundtable e l'Arctic Coast Guard Forum, che fanno parte delle cosiddette misure di sicurezza e di fiducia messe in atto dalle nazioni proprio per sciogliere potenziali tensioni. Per risolvere la questione delle sovrapposizioni sulle rivendicazioni, invece, gli Stati dovrebbero negoziare direttamente, come fanno già nel caso di altre frizioni.

Spesso il conflitto è una questione di percezione. Le regole più restrittive della Russia per la rotta del Mare del Nord potrebbero avere risvolti positivi, se portano a una navigazione più sicura e a una miglior protezione dell'ambiente. Regolamentare la navigazione vicino alle coste non è una prerogativa esclusiva della Russia o della regione artica: i canali di Suez e di Panama hanno norme che devono essere rispettate dalle navi. Una nuova rompighiaccio polare pesante degli Stati Uniti, l'unica nave del genere che avrebbero gli statunitensi, potrebbe essere impiegata per facilitare l'accesso alle proprie acque artiche per tutto l'anno. Le rompighiaccio, inoltre, non sono navi militari, e anche se lo fossero una nave non è una minaccia credibile per la flotta russa di rompighiaccio.

Azioni in apparenza provocatorie potrebbero avere spiegazioni alternative. Per molti cittadini russi e popoli indigeni, la regione artica è parte integrante della propria identità, che si è costituita in secoli di esplorazioni e dominio del nord del mondo. Quando una spedizione sottomarina russa ha piantato una bandiera sul fondo del Polo Nord, nell'agosto 2007, non lo ha fatto per appropiarsi di un territorio, ma per dare una dimostrazione simbolica, mirata alla propria opinione pubblica, della capacità della Russia di raggiungere anche i punti più lontani dell'Artide.

Ma come in qualsiasi altra parte del mondo potrebbe ancora scoppiare un conflitto, forse da un attore inaspettato. Dal 2013 a oggi le navi cinesi hanno fatto almeno 22 viaggi commerciali nel passaggio a nord-est: uno degli usi più intensi di quella rotta di un'altra nazione che non sia la Russia. La Cina cerca anche di trasformare l'Artide in un teatro globale. Nel gennaio 2018, il governo cinese ha pubblicato un rapporto sulla sua strategia nell'Artide, dichiarando che «la situazione oggi va al di là della sua natura originaria, limitata agli Stati artici o comunque locale». Ma l'arrivo della Cina non significa un aumento della posta in gioco. Russia e Groenlandia stanno accogliendo investimenti cinesi. La collaborazione economica potrebbe incoraggiare quella politica e prevalere. ■

PER APPROFONDIRE

Geologic Structures of the Arctic Basin. Piskarev A., Poselov V. e Kaminsy V. (*a cura*), Springer International Publishing, 2019.

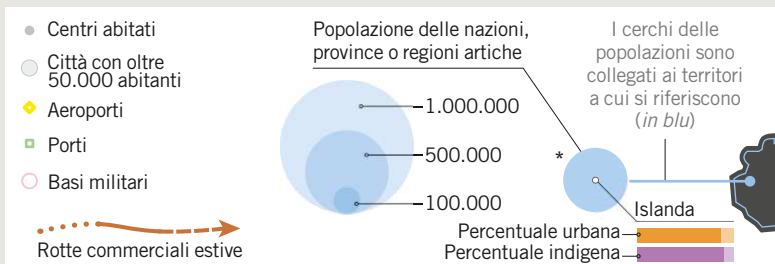
Arctic Council: **https://arctic-council.org.**

International Arctic Forum, San Pietroburgo, Russia, 9-10 aprile 2019: **https://forumarctica.ru/en.**

Convenzione delle Nazioni Unite sul diritto del mare (UNCLOS): **https://www.un.org/Depts/los/index.htm.**

Benvenuti al nord

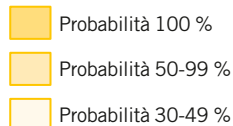
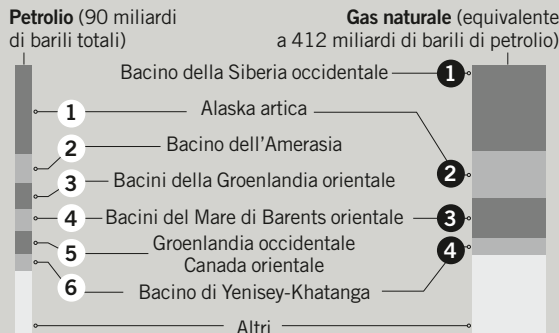
Mappe di Katie Peek, testo di Mark Fischetti

Con la fusione dei ghiacci, l'Artide diventa molto più accessibile e desiderabile. Uno studio del 2008 dell'U.S. Geological Survey ha determinato che il 13 per cento del petrolio mondiale (90 miliardi di barili) e il 30 per cento del gas naturale (47.000 miliardi di metri cubi) ancora da scoprire sono lì ad aspettarci (*mappa*). Circa la metà dell'Oceano Artico è profonda meno di 500 metri, facilmente raggiungibile dalle trivelle nei punti in cui il ghiaccio marino si è ritirato. Varie nazioni, in particolare la Russia, stanno costruendo numerosi aeroporti, porti e altre infrastrutture, oltre a espandere le basi militari per proteggere i propri investimenti e sostenere rotte commerciali sempre più trafficate.

Risorse naturali

Province geologiche che potrebbero contenere almeno un giacimento non ancora scoperto di 50 milioni di barili di petrolio, o il suo equivalente in gas naturale, estraibili con le attuali tecnologie.

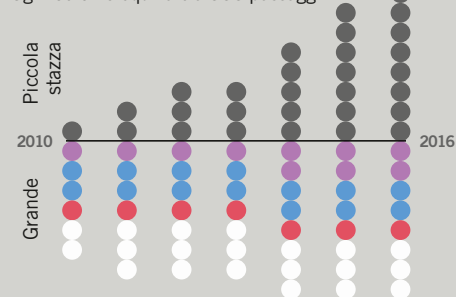
Probabilità 100 %

Probabilità 50-99 %

Probabilità 30-49 %

Sei province potrebbero contenere il 75 per cento del petrolio non ancora scoperto; quattro province potrebbero contenere il 70 per cento dell'equivalente in gas naturale.

Trasporti marittimi in aumento

Le navi di grande stazza devono navigare sotto la bandiera dello Stato in cui sono registrate. Quelle di piccola stazza no.

Stato di bandiera delle navi più grandi

- Russia
- Norvegia
- Altra nazione dell'Artide
- Altra nazione non artica

* Di solito i valori sono rappresentati dall'area superficiale dei cerchi, ma questo può portare a una visualizzazione imprecisa dei dati. Abbiamo scelto una scala per cui il raggio = (popolazione)$^{2/3}$.

† Dati indigeni e/o urbani non disponibili.

Fonti: U.S. Geological Survey (*dati su petrolio e gas*); Greg Fiske, Woods Hole Research Center, con dati da Spacequest.com (*dati sulle navi*); *The Indigenous World 2019*, Berger D.N. e altri, International Work Group for Indigenous Affairs, 2019 (*popolazioni Sami e Inuit*); statistiche finlandesi, svedesi, norvegesi, islandesi, groenlandesi, canadesi, U.S. Census Bureau; servizio statistico della Federazione russa; Arctic Portal (*Passaggio a nord-est e a nord-ovest*); International Institute for Strategic Studies (*basi militari*); Heritage Foundation (*basi militari*); Geonames Gazetteer (*aree urbanizzate; aeroporti*); World Port Index (*porti*).

BIOLOGIA

La cellula invulnerabile

I biologi stanno costruendo un organismo in grado di sbarazzarsi di qualsiasi tipo di virus. Il prossimo passo potrebbero essere cellule umane inattaccabili

di Rowan Jacobsen

IN BREVE

Gli attacchi dei virus alle cellule costano miliardi di danni all'industria farmaceutica – che fa uso di cellule batteriche per ottenere suoi prodotti – e ad altri importanti settori industriali. Inoltre possono essere dannosi anche per la salute umana.

Un progetto per ricodificare il DNA di una cellula batterica sta eliminando tutte le vie genetiche che la rendono vulnerabile ad attacchi virali.

Questa cellula dovrebbe funzionare normalmente e aprire la via a cellule umane a prova di virus.

Illustrazione di Ellen Weinstein

Il giornalista **Rowan Jacobsen** è l'autore dell'articolo *Fantasmi di fiori*, pubblicato sul numero di aprile 2019, che parla della resurrezione dei geni estinti.

Il virus si posa sulla cellula come un ragno che atterra su un pallone 1000 volte più grande. Ha sei zampe sottili, distese sotto un corpo che sembra una siringa con una testa a bulbo. È un predatore detto lambda, e la sua preda è un batterio *Escherichia coli*. Una volta trovata la vittima, il lambda fa ciò che innumerevoli virus hanno sempre fatto da quando è emersa la vita: si aggancia alla membrana della cellula con le zampe, attacca a un poro la sua parte simile a una siringa e si contrae, iniettando il proprio DNA all'interno.

Il DNA contiene le istruzioni per realizzare altri virus, e in sostanza un virus non è altro che questo: una capsula proteica contenente le istruzioni per produrre altre copie di sé. Non avendo gli strumenti molecolari per costruire qualcosa di nuovo, i virus invadono le cellule e dirottano l'attrezzatura cellulare, usandola per replicarsi finché diventano così numerosi da sfondare le pareti della cellula. E riescono a farlo perché tutti gli organismi, dai rinoceronti delle pianure africane ai rhinovirus che vi infettano il naso, usano lo stesso sistema di codifica, basato sugli acidi nucleici come il DNA. Se si inserisce il codice nella cellula, questa userà le istruzioni per realizzare proteine.

Nel batterio infettato comincia quel processo: prendono forma nuove proteine virali. Sembra che al lambda vada tutto bene: nel giro di qualche minuto la cellula sarà piena di nuovissimi virus fino a scoppiare. E quando i virus usciranno ciascuno di loro andrà a cercare un altro batterio per ripetere questo ciclo senza fine.

Ma poi il macchinario della cellula si blocca: non riesce proprio a leggere il DNA del virus. Questo fallimento non è mai avvenuto prima nel duello, all'apparenza interminabile, tra virus e cellula. E adesso vuol dire che il lambda è condannato.

Il motivo della sua sconfitta è che questo ceppo di *E. coli* è stato riprogrammato per usare un sistema operativo del DNA mai esistito sulla Terra, con cui il codice virale è incompatibile. Queste differenze lasciano il lambda disorientato come un virus per computer Windows in un Mac. Gli attacchi da parte di altri virus subiranno lo stesso destino. Le persone che hanno progettato questo batterio e il suo nuovo codice ritengono che questa caratteristica lo renderà immune a tutti i virus. Lo chiamano *rE.coli-57*, e per lui hanno progetti ambiziosi.

rE.coli-57 è in via di realizzazione in un laboratorio della Harvard Medical School, da parte di un gruppo guidato dalla giovane biologa Nili Ostrov. Da cinque anni Ostrov segue ossessivamente ogni dettaglio della ricostruzione genetica del batterio, trascorrendo ore estenuanti sotto le luci fluorescenti del laboratorio sperimentale. È il progetto di editing genetico più elaborato di sempre, e nel 2016 gli è stato dedicato un articolo fondamentale su «Science», che ha identificato 148.955 modifiche al DNA necessarie affinché la cellula sia a prova di virus. Ostrov e colleghi ne avevano eseguito il 63 per cento, come da loro stessi riferito, e la bestia stava bene.

Dopo tre anni, la cellula ricostruita è quasi pronta. Presto la scena appena visualizzata avverrà non solo con uno, ma con centinaia di virus in una piastra di Petri. Se *rE.coli-57* sopravvivrà, potrebbe cambiare per sempre il rapporto tra i virus e le loro prede, compresi noi.

I virus sono incredibilmente numerosi: ogni metro quadrato della Terra ne contiene 800 milioni. E tormentano non solo noi con le malattie, ma anche le industrie che usano le cellule per realizzare prodotti come yogurt o farmaci. La Genzyme (che oggi fa parte del gruppo Sanofi), colosso delle biotecnologie che usa i batteri per produrre le molecole dei farmaci, ha perso metà del proprio valore di mercato dopo che nel 2009 un'infezione virale nel suo stabilimento di Allston, negli Stati Uniti, ha compromesso la sua linea di produzione, provocando gravi carenze di farmaci. I virus sono un flagello costoso anche nel settore dei latticini, che impiega i batteri per far fermentare formaggio e yogurt: in caso di contaminazione virale questi prodotti devono essere buttati. Un batterio a prova di virus potrebbe essere un affare miliardario.

Una cellula di questo tipo potrebbe inoltre dare il via a un nuovo mondo di medicinali su misura. «Se vogliamo creare anticorpi e farmaci proteici di lusso, dobbiamo modificarli sotto l'aspetto chimico», spiega Ostrov. «Per le case farmaceutiche cambierebbe tutto». Tutte le proteine naturali sono costituite dagli stessi 20 amminoacidi, ma il sistema operativo modificato di *rE.coli-57* gli permetterebbe di costruire nuove proteine usando amminoacidi esotici, proprio come nuovi mattoncini LEGO ampliano le possibilità di costruzione rispetto ai pezzi dell'insieme di base. Le proteine progettate su mi-

sura potrebbero colpire malattie come l'AIDS o il cancro con una precisione straordinaria.

Ma c'è un aspetto più controverso: il successo di *rE.coli-57* potrebbe essere un passo verso l'obiettivo di cellule umane a prova di virus grazie a un DNA inattaccabile dal dirottamento virale. Questo risultato avrebbe un valore inestimabile per la ricerca medica, danneggiata dalle infezioni virali delle linee cellulari umane nelle piastre di laboratorio che si usano per sviluppare e testare i farmaci. Gli scettici però dubitano che le cellule ricodificate funzionerebbero come quelle «normali»: non sarebbero un banco di prova affidabile. Inoltre l'idea preoccupa chi teme che una simile ricodifica ci porti un po' più vicino alla creazione di persone con DNA modificato. Tuttavia, nessuno dei partecipanti al progetto ha proposto una simile applicazione sugli esseri umani. Ricodificare una sola cellula umana in una piastra di laboratorio sarebbe straordinariamente complicato perché il genoma umano è lungo 3,2 miliardi di lettere, 800 volte più di quello di *E. coli*. Ma *rE.coli* è un primo passo, essenziale e sbalorditivo.

Nuovi codici

La ricodifica sconfigge i virus invasori perché altera il linguaggio usato dalle cellule per sintetizzare le proteine, cioè le molecole che ogni forma di vita al mondo usa per fare qualsiasi cosa. Le proteine sono composte da unità più piccole, gli amminoacidi, ciascuna delle quali ha un codice DNA di tre lettere, ricavato da una combinazione tra le quattro basi del DNA: A, C, G e T. Per esempio TGG indica il triptofano e CAA la glutammina. Questi codici di tre lettere si chiamano codoni, e ogni gene non è altro che una loro sequenza lineare.

La sintesi proteica avviene quando la sequenza è inviata alle fabbriche delle cellule, i ribosomi, dove i codoni si appaiano con molecole dette RNA di trasporto (tRNA). Ogni tRNA ha un'estremità che si collega a un particolare codone e un'altra che si collega a un solo tipo di amminoacido. Dato che la sequenza dei codoni si sposta lungo la catena di montaggio delle proteine, i tRNA legano insieme gli amminoacidi finché la proteina è completa.

Questo sistema ha però una particolarità importante: una notevole ridondanza. Ci sono 64 codoni perché ci sono 64 combinazioni di tre lettere con A, C, G e T. Ma gli amminoacidi sono solo 20: significa che per gran parte degli amminoacidi esistono più codici. AGG per esempio indica l'arginina, che però corrisponde anche a CGA. Alcuni amminoacidi hanno sei codoni.

Nel 2004 George Church, genetista di Harvard e capo di Ostrov, ha cominciato a chiedersi se tutti questi codoni fossero necessari. E se ogni AGG nel genoma di *E. coli* fosse trasformato in CGA? Dato che entrambi sono codici dell'arginina, il batterio continuerebbe a formare tutte le sue proteine normali. Ma – ed è un punto fondamentale – se anche il tRNA appaiato all'AGG fosse eliminato dalla cellula, allora il codone AGG sarebbe un vicolo cieco nel processo di sintesi proteica.

Pensando a che cosa succederebbe eliminando alcuni tRNA, Church ha avuto un'illuminazione. «Ho capito che così le cellule diventerebbero resistenti a tutti i virus – racconta – il che potenzialmente sarebbe un vantaggio enorme». I virus come il lambda si riproducono facendo sì che una cellula legga i geni virali e formi le proteine usando quelle sequenze. Ma se il tRNA dell'AGG è cancellato dalla cellula, ogni gene virale che include un codone AGG resterà bloccato ad aspettare un tRNA che non esiste più, e non si formerà alcuna proteina virale.

I virus evolvono in modo impetuoso; Church sospettava che, nel caso fosse scomparso un singolo tRNA, sarebbero presto riusciti ad aggirare l'ostacolo. Ma eliminando un numero sufficiente di codoni e tRNA, per un virus sarebbe stato pressoché impossibile trovare spontaneamente la combinazione giusta di mutazioni per usare il codice modificato. *E. coli* aveva sette codoni relativamente rari. Comparivano in tutti i suoi 3548 geni, in media 17 volte per gene. Se fossero stati eliminati tutti i tRNA corrispondenti, un virus avrebbe dovuto sviluppare circa 60.000 sequenze nuove, ciascuna con il codone sostitutivo giusto, esattamente nel punto giusto. E questo non sarebbe mai successo.

Nel 2004 un simile scenario era puramente speculativo. Era già abbastanza difficile cambiare un singolo gene in un organismo; modificarne migliaia, come è necessario per eliminare tutti gli esemplari di determinati codoni, era impossibile. Ma nel 2014, grazie ai progressi tecnologici, questa prospettiva era diventata più o meno immaginabile. Così Church ha cominciato a cercare qualcuno che avesse gli stimoli e le capacità organizzative per affrontare il più grande progetto di editing genetico di tutti i tempi.

Una cellula ricodificata potrebbe dare il via a un nuovo mondo di medicinali su misura

È stato allora che nel suo laboratorio è arrivata Ostrov come ricercatrice post-doc. Se Church è stato l'architetto di *rE.coli-57*, Ostrov ne è diventata l'ingegnera e l'appaltatrice principale. Ostrov aveva una lunga esperienza nella costruzione di molecole. Cresciuta in Israele, ha frequentato l'Università di Tel Aviv, dove ha modificato una proteina aggiungendo alcuni amminoacidi legati a una particella di metallo. Quando diverse di queste proteine modificate si univano, formavano un nanofilo in grado di trasmettere la corrente. «È stato fantastico – ricorda Ostrov – ho pensato: "Wow, possiamo usare la biologia per fare qualcosa di utile"». In seguito, alla Columbia University, ha conseguito il PhD modificando il lievito per il pane per fargli produrre un pigmento rosso quando individuava microbi patogeni; il progetto, usato per rilevare il colera, ha vinto un premio Grand Challenge Exploration della Bill & Melinda Gates Foundation.

Era un curriculum di tutto rispetto, ma il progetto di Church era infinitamente più difficile. I sette codoni da eliminare comparivano 62.214 volte nel genoma di *E. co-*

Virus contro cellula

Milioni di virus infettano e conquistano cellule di esseri umani e batteri, trasformandole in fabbriche di virus. I biologi stanno riprogettando il DNA di un batterio, *rE.coli-57*, con geni che gli permettono di funzionare normalmente come una cellula sana, resistendo però a tutti gli attacchi virali.

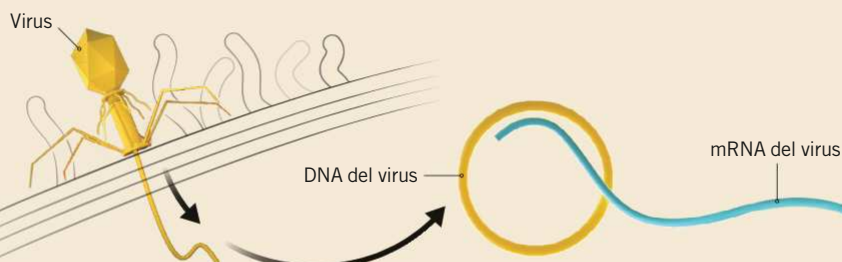
1 Infiltrazione virale
Un virus è sostanzialmente un dispositivo biologico che produce copie di sé. Per farlo usa la cellula che infetta, portandola con l'inganno a sintetizzare proteine virali.

2 Dirottamento
Quel mRNA del virus si sposta nel ribosoma, cioè la fabbrica di proteine della cellula. Qui ogni gruppo di tre lettere di mRNA, detto codone, è appaiato a una specifica molecola complementare detta tRNA (*in blu*). Ciascun tRNA è collegato a un particolare blocco costitutivo delle proteine, o amminoacido (*in giallo*).

Illustrazione di Campbell Medical Illustration

li. Ricodificarli tutti significava eseguire 148.955 modifiche al DNA. Sui mezzi di comunicazione si era parlato molto di editing genetico rapido e facile, ma nessuno strumento era minimamente in grado di eseguire una simile quantità di modifiche.

Tuttavia, i grandi progressi nella sintesi del DNA indicavano un'altra soluzione: costruire un genoma di *E. coli* ricodificato partendo da zero. Il DNA si può produrre a livello biochimico con stampanti apposite: funzionano come una stampante a getto d'inchiostro che spruzza A, C, G e T. Oggi le aziende che sintetizzano il DNA riescono a produrne sequenze affidabili lunghe fino a circa 4000 lettere.

Intorno al 2015 il gruppo di Ostrov ha scaricato il genoma standard di *E. coli*, un filamento lungo 4 milioni di lettere, da una banca dati e lo messo su un computer. Poi i ricercatori hanno setacciato l'intera sequenza, sostituendo tutti i 62.214 esemplari dei sette codoni rari con i loro sinonimi. Per sicurezza hanno modificato anche geni, in modo che il batterio dipendesse da un amminoacido sintetico disponibile nel suo brodo di coltura: quella molecola sintetica non esiste in natura, quindi se anche il batterio fosse sfuggito al laboratorio non sarebbe sopravvissuto. Sullo schermo del computer è comparso il risultato: il nuovo genoma di *rE.coli-57*. In seguito gli scienziati hanno diviso i suoi 4 milioni di lettere in pezzi da 4000 lettere con estremità sovrapposte, inviando i file a un'azienda che sintetizza il DNA. «L'abbiamo tagliato al computer – racconta Ostrov – come un documento Word». L'azienda ha stampato il DNA e l'ha rispedito con la FedEx. Il gruppo ha unito questi pezzetti da 4000 lettere formando 87 frammenti più grandi, da 50.000 lettere ciascuno, cioè circa 40 geni.

Naturalmente quei frammenti erano solo DNA, nient'altro che codice. Per portare in vita quel codice serve una cellula, e nessuno sa come costruirne una partendo completamente da zero. Così Ostrov ha adottato un metodo diverso, per così dire lavorando a cottimo: ha cominciato con colonie di *E. coli* normale e via via ha sostituito ciascun pezzo del loro genoma con un frammento ricodificato, uno alla volta, verificando dopo ogni trapianto se il paziente era sopravvissuto.

Ricostruire una cellula

Sulle panche lunghe e nere del laboratorio di Church, tra centrifughe, miscelatori a vortice, rastrelliere per pipette e mucchi di piastre di Petri, il gruppo di Ostrov ha allevato 87 colonie di *E. coli* normale in un'incubatrice grande come un frigorifero compatto, ha inserito in gruppi di microbi un diverso frammento da 50.000 lettere ricodificato, e quindi ha aspettato di vedere se riuscivano a sopravvivere. Ostrov non si faceva troppe illusioni. Forse l'evoluzione aveva scelto i suoi codoni per motivi inaccessibili alla comprensione umana.

Contrariamente alle previsioni, la maggior parte delle colonie non aveva problemi. Solo 20 segmenti modificati fermavano la crescita dei microbi. Ma erano 20 di troppo. Affinché *rE.coli-57* fosse a prova di virus, tutte le sezioni ricodificate dovevano funzionare. «Per prima cosa abbiamo cercato di restringere la ricerca al gene

specifico che non funzionava», racconta Ostrov. «Abbiamo diviso il segmento da 40 geni in due versioni da 20, quindi le abbiamo testate. Poi abbiamo ristretto il campo a quattro geni che potevano rappresentare il problema. Poi a un gene. E infine abbiamo pensato a quale potesse essere il codone problematico».

Si è scoperto che la causa principale dell'intoppo erano gli errori di stampa del DNA. In altre parole, le sequenze di DNA ricevute dal gruppo di Ostrov non erano esattamente quelle ordinate: fino a poco tempo fa la sintesi del DNA presentava spesso questo problema. Ostrov ha ricontattato l'azienda e ha ricevuto sequenze nuove senza errori. Una volta sostituito il DNA difettoso, oltre il 99 per cento dei geni ricodificati funzionava. A quanto pare, il progetto non era una follia.

Restava però una manciata di problemi che sembravano effettivamente una questione di funzionalità delle proteine o del DNA, non di controllo qualità alla stampante. Ostrov ha dovuto immaginare che cosa le nascondesse l'evoluzione: perché il passaggio a un codone sinonimo, che codificava esattamente lo stesso amminoacido, uccideva o danneggiava l'organismo?

Risolvere i problemi in questi punti è stato come aprire un sentiero in un territorio selvaggio senza una mappa. Per esempio, il tasso di riproduzione nei batteri con una sezione 21 ricodificata era fortemente rallentato. Perché? Non potendo farsi guidare dalla letteratura scientifica su questi filamenti di DNA ricodificati – il suo gruppo è stato il primo a modificarli – Ostrov ha analizzato con cura il comportamento di tutti i geni della sezione, confrontandone i prodotti con quelli dei batteri normali. Ha trovato cinque geni collegati che erano intatti ma, chissà perché, non stavano facendo niente.

Si è scoperto che il problema dipendeva dall'equivalente genetico di un interruttore *on/off*. I geni sono preceduti da sequenze di DNA, dette promotori, che determinano se ciascun gene è attivo o no. Nelle forme di vita superiori, promotori e geni sono distinti, con punti di partenza e di arrivo evidenti, ma a volte i geni batterici si sovrappongono; la sequenza di DNA alla fine di un gene segna anche l'inizio del successivo. Ostrov ha scoperto che una sequenza di DNA in un gene detto *yceD* funzionava anche come promotore, cioè interruttore, dei cinque geni successivi. Ricodificando *yceD,* Ostrov inavvertitamente li aveva spenti. Quindi ha cambiato tre codoni in *yceD* in modo che il loro DNA corrispondesse di più alla struttura di un promotore noto ed efficace. La produttività dei cinque geni è aumentata e i batteri hanno cominciato a riprodursi normalmente.

Il gruppo ha avuto ancora più difficoltà con la sezione 44 ricodificata, che aveva completamente sterminato la sua colonia. I ricercatori hanno ristretto il campo problematico fino a individuare un gene, *accD*, usato dai batteri per produrre gli acidi grassi. Le cellule ricodificate non sintetizzavano nemmeno una proteina accD. Ostrov ha analizzato la struttura del gene ricodificato e ha ipotizzato che il problema fosse proprio all'inizio della sequenza. Nel DNA le A e le T si legano naturalmente, così come le G con le C. Nel mRNA, la molecola usata dal DNA per inviare il codice al ribosoma che sintetizza le proteine, una base indicata con l'abbreviazione U sostituisce la T, e si lega all'A con la stessa specificità. Se le lettere sono in un certo ordine – per esempio molte A seguite da molte T – la fine della molecola può ripiegarsi su sé stessa come nastro adesivo e ostruire gli apparati cellulari. Ostrov ha modificato il gene al computer, sostituendo 10 dei suoi 15 codoni ricodificati con altri, loro sinonimi, che sembravano meno portati a formare pieghe appiccicose. Quando ha inserito nei batteri il nuovo frammento di DNA, la colonia è tornata alla vita.

Steph Stevens

La biologa Nili Ostrov e i suoi colleghi alla Harvard University hanno creato *rE.coli-57*, un batterio *E. coli*, per il resto normale, con quasi 150.000 modifiche al DNA in tutto il suo genoma, con l'obiettivo di renderlo a prova di virus.

E così si è proseguito, risolvendo un guasto per volta: i ricercatori armeggiavano con la biologia ma pensavano come meccanici, seguendo sempre il ciclo ingegneristico di progetto, costruzione e test. Stranamente, non ci sono stati ostacoli insormontabili. «Finora non abbiamo incontrato difficoltà insuperabili», racconta Ostrov. «Il codice ci dà molto spazio di manovra».

A prova di virus

Quest'anno, dopo avere aggiunto segmenti genetici funzionanti di un ceppo a segmenti funzionanti in un altro, Ostrov ha trasformato gli 87 ceppi originali in otto linee sane, ciascuna con un ottavo del genoma completamente ricodificato. Ogni volta che gli scienziati combinavano i segmenti emergevano nuove incompatibilità che bisognava risolvere. Entro l'inizio della primavera però le otto linee si stavano rapidamente accorpando per diventare quattro e in seguito due. Presto ci sarà un ceppo di *rE.coli-57* ricodificato al 100 per cento.

Una volta che quel ceppo sarà pronto, l'ultimo passo sarà eliminare i tRNA associati ai codoni mancanti. Per la cellula non sarà un problema perché i suoi geni use-

ranno tRNA sinonimi ancora esistenti. Dovrebbe invece essere un problema per un virus in arrivo: i suoi geni, non essendo stati modificati, avranno codoni che richiederanno un tRNA non più esistente. Nessun tRNA significa nessun amminoacido in quel punto della sequenza della sintesi proteica, che si interrompe. Nessuna nuova proteina virale, nessuna nuova copia del virus. Il DNA virale resta prigioniero della cellula, isolato, solo, incapace di replicarsi e provocare danni.

Ostrov prevede di verificare questo scenario in una versione microscopica del vecchio film *Mad Max – Oltre la sfera del tuono,* in cui un eroe, intrappolato in un'arena, deve affrontare una serie di avversari. Questa arena sarà un piccolo contenitore di vetro. I biologi aggiungeranno il lambda a una piastra contenente una colonia sana di *rE.coli-57*. Quindi faranno un passo indietro e assisteranno a un duello all'ultimo sangue tra gli organismi. Se *rE.coli* sopravvivrà, i ricercatori aggiungeranno un altro virus predatore di batteri, e poi un altro ancora. È difficile immaginare come perfino il più abile dei virus possa decifrare il codice di *rE.coli* con la sua alterazione raffinata. Ma d'altronde, nessun virus ci ha mai dovuto provare. Entreranno due organismi, e uno se ne andrà.

Ostrov non vuole sbilanciarsi indicando una data precisa per questa competizione, dato che non ha ancora il singolo filamento completamente ricodificato, ma è convinta che il suo gruppo sia vicino alla meta. «Presto, non tardi», spiega. «Non ho dubbi». E accenna che prossimamente potrebbe essere ora di festeggiare con i cocktail brasiliani che le piacciono: «Quando il lavoro sarà finito non me ne starò buona: chiamerò dalla spiaggia con una *caipirinha* in mano».

L'immunità virale sarà già di per sé un buon motivo per festeggiare *rE.coli-57*, ma il batterio offrirà anche, come hanno scritto Ostrov e colleghi nel loro articolo su «Science», «un telaio unico con una maggiore funzionalità sintetica, ampiamente utilizzabile nella biotecnologia». In altre parole, il microbo sarà una piattaforma flessibile per assemblare nuovi tipi di proteine.

Potrebbe essere un vantaggio per lo sviluppo dei farmaci. Molti di quelli anticancro e immunoterapici sono proteine che si degradano velocemente nel corpo, ma ricostruirli con amminoacidi esotici potrebbe aumentarne nettamente la durata. Per progettare queste terapie Church ha già lanciato una *start-up*: GRO Biosciences (l'acronimo significa *genomically recoded organism*, «organismo ricodificato genomicamente»).

Vita alterata

Sul prossimo futuro incombe la visione di cellule umane ricodificate, a prova di virus. Queste cellule potrebbero risolvere l'annoso problema della contaminazione virale delle linee cellulari umane coltivate (come le famose cellule tumorali di Henrietta Lacks), ampiamente usate nella ricerca medica. Nei laboratori, le linee cellulari umane sono impiegate regolarmente come banco di prova per sviluppare nuovi medicinali e idee terapeutiche. Ma quando i virus infettano queste cellule è pressoché impossibile eliminarli, così gli esperimenti si interrompono e gli scienziati non possono fare altro che ricominciare da capo. Se le terapie si potessero sviluppare più facilmente, salverebbero vite. Il Center of Excellence for Engineering Biology, un'impresa globale di cui Church è tra i fondatori, ha dichiarato che il suo progetto iniziale è la ricodifica delle cellule umane. *rE.coli-57* sarebbe una tappa importante del percorso.

Non sorprende che l'idea di riprogettare il sistema operativo delle cellule umane allarmi alcuni critici. Per esempio, le cellule potrebbero non essere repliche affidabili di quelle naturali. E anche se gli scienziati del centro non hanno mai proposto di fare niente con le cellule che vada oltre le linee cellulari coltivate, non è da escludere che si possa creare un essere umano ricodificato, che a sua volta potrebbe essere a prova di virus.

E sarebbe un male, sostiene Vincent Racaniello, virologo della Columbia University, che ha stroncato l'idea nel suo blog scientifico. «La sovrabbondanza di codoni ha un motivo: per esempio fanno da cuscinetto contro le mutazioni letali», ha scritto. «Con ogni probabilità, ricodificare il genoma umano in questo modo avrà gravi effetti collaterali».

I biologi aggiungeranno un virus a una piastra con *rE.coli-57*. Poi assisteranno a un duello all'ultimo sangue tra gli organismi

Tra gli scienziati che partecipano a questo progetto, nessuno ha proposto di modificare il DNA di un bambino e vedere che cosa succede, come è accaduto in Cina l'anno scorso. Sostengono invece che studiare in modo coscienzioso e trasparente il comportamento delle cellule umane ricodificate potrebbe darci nuove conoscenze sul rapporto tra noi e nostre malattie più gravi. Fin dalla nostra comparsa sulla Terra siamo rimasti bloccati nel sistema a 64 codoni, con le malattie provocate dai virus che lo sfruttano. Nel giro di alcuni anni potremmo sapere se dovremo accettare questa situazione o no.

Ostrov non partecipa al progetto del centro, «A scanso di equivoci, non ricodifico le cellule umane», ma dice che è importante esplorare le incognite genetiche in sicurezza, nelle piastre di laboratorio. «C'è un motivo per cui l'evoluzione ha scelto certi codoni. Ma sappiamo che ci sono altre opzioni plausibili», spiega. «Sostituendoli, riusciamo a indagare su ciò che accade. Vedremo che cosa funziona e che cosa no, e capiremo meglio le regole». La conoscenza di questi principi potrà permetterci di migliorare alcuni degli organismi che li sfruttano. ■

PER APPROFONDIRE

Design, Synthesis, and Testing toward a 57-Codon Genome. Ostrov N. e altri, in «Science», Vol. 353, pp. 819-822, 19 agosto 2016.

Beyond Editing to Writing Large Genomes. Chari R. e Church G.M., in «Nature Reviews Genetics», Vol. 18, pp. 749-760, dicembre 2017.

L'ingegneria della vita. Baker D. e altri, in «Le Scienze» n. 456, agosto 2006.

FISICA

Idee pazzesche, in senso buono

I razzi di oggi non ci permetteranno di arrivare fino alle stelle. Alcuni ricercatori stanno lavorando alle frontiere della fisica per trovare qualcosa che ci porti lassù

di Sarah Scoles

Sarah Scoles è una giornalista e saggista scientifica freelance. Collabora, tra l'altro, con «WIRED Science» e «Popular Science»; ha scritto il libro *Making Contact: Jill Tarter and the Search for Extraterrestrial Intelligence* (Pegasus Books, 2017).

Quando Heidi Fearn, un fisico teorico della California State University a Fullerton, tornò da un periodo sabbatico, nel 2012, trovò una sorpresa nel laboratorio annesso al suo ufficio: un uomo anziano di nome James F. Woodward. Fearn lo conosceva di vista: era professore di storia della scienza e docente a contratto di fisica. Con i capelli bianchi e l'abitudine di guardare sempre tutto da sopra le lenti degli occhiali, era perfetto nel suo ruolo. Ciò nonostante, Fearn pensò: «Che ci fa questo tizio in un locale del mio ufficio?».

A quanto pareva, Woodward era appena stato sballottato nello spazio-tempo: poco prima l'università aveva requisito il suo ufficio per farne il nuovissimo Gravitational Wave Physics and Astronomy Center, e i grandi capi dell'istituzione accademica avevano trasferito lo studioso in quel locale relativamente inutilizzato.

All'inizio Fearn lo considerò un intruso, ma cambiò presto idea. Woodward studiava un argomento di nicchia, ben al di fuori dell'ambito di cui la ricercatrice si occupava di solito. Fearn era specializzata in ottica quantistica, cioè il modo in cui la luce interagisce con la materia, che era un argomento molto più di moda rispetto a quello a cui si interessava Woodward: l'ipotesi di un metodo di propulsione per astronavi così potente che, se fosse diventato realtà, avrebbe potuto portare la nostra specie fino alle stelle.

O almeno questo era quanto sosteneva il ricercatore. Fearn, la cui testa rasata e il perenne sorrisetto sulle labbra suggeriscono un costante scetticismo, non ne era altrettanto sicura. «Non ero proprio convinta che quello che stava facendo fosse corretto», racconta. Quando ci passava accanto, tutti i giorni, vedeva qualcosa che assomigliava più a un esperimento di laboratorio per un corso di Fisica I che a un sistema di propulsione futuristico. L'apparato di Woodward comprendeva una bilancia inchiavardata a terra, con una gabbia di metallo su un lato, contrappesi sull'altro lato e cavi elettrici che correvano avanti e indietro. «Si possono generare effetti gravitazionali molto grandi semplicemente spingendo un po' di materia», prometteva il ricercatore, riferendosi nello specifico alla materia all'interno della scatola di metallo.

Woodward sosteneva di poter indurre variazioni piccolissime e velocissime nella massa di un oggetto, rendendolo più leggero o più pesante, e diceva che tirandolo e spingendolo avanti e indietro strategicamente mentre la massa cambiava sarebbe riuscito a generare *propulsione*. Mostrò a Fearn dei puntini sul grafico in uscita, ognuno dei quali rappresentava un movimento generato. «Sì, vabbè», pensò la ricercatrice, ma continuò a guardare il grafico ogni giorno. «Ogni volta che ci passavo davanti, i puntini sembravano diventare sempre più grandi», racconta. Alla fine Woodward le chiese se voleva aiutarlo.

Fearn aveva un incarico a tempo indeterminato e le piaceva Star Trek, perciò rispose: «Sì, certo». La strana coppia, che collabora da allora, sta sviluppando il MEGA (*Mach Effect Gravity-Assist drive*), un sistema di propulsione ad assistenza gravitazionale basato sull'effetto Mach. E pur essendo ancora ai margini della scienza tradizionale il sistema ha guadagnato credibilità. Altri tre laboratori hanno rilevato una spinta simile emulando l'allestimento originale dell'esperimento, e il MEGA ha ottenuto due finanziamenti tra i più ambiti della NASA.

Ma non si tratta di investimenti qualsiasi. Provengono dal dipartimento più «spaziale» dell'agenzia, il NASA Innovative Advanced Concepts Program (NIAC), che sovvenziona progetti di ricerca che sarebbero «importantissimi se si rivelassero corretti». Nel 2017 e nel 2018 i metodi di propulsione avanzata (cioè che inviano una maggiore quantità di massa attraverso uno spazio più esteso usando meno carburante rispetto ai razzi tradizionali) si sono aggiudicati circa il 20 per cento di quei fondi. I progetti vanno da quelli estremamente strani a quelli solamente eccentrici, ma tutti quanti si allontanano dai percorsi di ricerca tradizionali e puntano a qualcosa di nuovo.

Illustrazione di Vincent Di Fate (*pagine precedenti*)

IN BREVE

I razzi chimici e i motori elettrici non riusciranno mai a imprimere ai veicoli spaziali una spinta sufficiente a raggiungere altri sistemi planetari in tempi ragionevoli.

La NASA sta finanziando studi su tecnologie di propulsione bizzarre, che potrebbero rivelarsi semplici pazzie ma potrebbero anche dare risultati concreti.

Uno di questi progetti si concentra sullo studio del cosiddetto effetto Mach; l'idea è di usare il principio di inerzia allo scopo di generare una spinta.

Nel laboratorio che condividono, James F. Woodward (*a sinistra*) e Heidi Fearn (*a destra*) cercano un nuovo modo di viaggiare nello spazio.

Fotografie di Spencer Lowell

Ai confini della fantascienza

I fondi NIAC cercano di rimediare al fatto che le forme di propulsione non hanno quasi fatto progressi dalla metà del Novecento. Gran parte dei mezzi spaziali usa propellenti chimici, la versione spaziale della benzina. Nei razzi tradizionali queste sostanze si combinano e reagiscono tra loro, e così facendo si riscaldano e si espandono. Dato che diventano troppo grandi per la camera che le contiene, escono di getto dal retro del mezzo, generando una spinta. La propulsione consiste semplicemente nell'usare una forza in una direzione per produrre una forza uguale nella direzione opposta. È la forza che ci spinge indietro quando ci diamo una spinta contro la parete di una piscina.

Tuttavia il carburante è pesante e inefficiente. Per ottenere una spinta davvero enorme, un veicolo dovrebbe trasportare così tanto carburante che non riuscirebbe ad alzarsi da terra. Per le missioni verso altri sistemi solari o anche per viaggiare molto più velocemente nel nostro, il carburante chimico non andrà mai bene. «Quel tipo di propellenti ha solo quel tanto di energia», afferma John Brophy, del Jet Propulsion Laboratory (JPL) della NASA, a capo di un altro progetto sovvenzionato dal NIAC e intitolato *Un'architettura di propulsione rivoluzionaria per le prime missioni interstellari*. «Possiamo essere ingegnosissimi e costruire ugelli enormi, ma quello è un problema che non possiamo risolvere», osserva.

Alcuni progetti verso lo spazio profondo, come la missione Dawn della NASA verso la fascia degli asteroidi, hanno usato invece propulsori elettrici. Di solito questo tipo di sistemi usa l'energia elettrica per imprimere un'accelerazione a particelle cariche, che poi escono di getto dal razzo a velocità che possono superare di 20 volte quelle dei carburanti tradizionali. Tuttavia anche questo tipo di sistema non ha più fatto progressi. «Se andiamo a vedere, quasi tutti i sistemi di propulsione elettrica furono inventati negli anni cinquanta e sessanta del secolo scorso», afferma Dan M. Goebel, ricercatore senior del JPL. «È come se da allora non ci fosse stata quasi nessuna idea nuova».

Il NIAC, invece, punta proprio sulle idee nuove. Il programma funziona come capitale di rischio della NASA, finanziando tecnologie che potrebbero dare risultati enormi in caso di successo. Idee «pazzesche» secondo Jason Derleth, direttore esecutivo del NIAC, che spiega: «Quando parlo di "idee pazzesche" intendo cose a cui nessuno pensa». Idee 10 volte migliori della tecnologia attuale, che arrivino all'improvviso a dare una scrollata a una situazione stagnante. Nel mondo delle start-up si parlerebbe di *disruption*.

Come esempio, Derleth cita il lavoro di Philip Lubin all'Università della California a Santa Barbara. Qualche anno fa Lubin ha proposto un progetto chiamato Starchip Enterprise: un satellite piccolissimo dotato di una «vela fotonica» (una nuova versione di un'idea precedente). L'idea era di sparare laser potentissimi dall'orbita terrestre verso la vela del satellite; quando questa fosse stata colpita avrebbe riflesso la luce, e la sua quantità di moto avrebbe fatto avanzare l'astronave. Il NIAC ha assegnato fondi a Lubin nel 2015 e nel 2016 e oggi il ricercatore lavora a un progetto delle Breakthrough Initiatives per inviare una vela fotonica a propulsione laser fino alla stella più vicina. Questa è un'idea pazzesca in senso buono, come piace al NIAC. «È pazzesca abbastanza da poter anche funzionare», afferma Derleth, e aggiunge: «Il NIAC vuole arrivare ai confini della fantascienza, ma senza superarli. Facciamo del nostro meglio per non superarli».

Ma la distanza tra scienza e fantascienza è infinitesimale a questi bassi «livelli di maturità tecnologica» (*technology readiness levels*, o TRL), un sistema di classificazione usato dalla NASA per valutare quanto è matura un'innovazione. I pannelli solari del lander InSight per l'esplorazione di Marte hanno TRL pari a 9, cioè sono già in funzione nello spazio. Il NIAC invece cerca progetti con TRL pari a 1, 2 e a volte 3, cioè progetti nelle prime fasi di sviluppo, che hanno bisogno ancora di molto lavoro prima di essere usati nel mondo reale.

In genere ogni anno circa 200 gruppi presentano proposte per i fondi NIAC di Fase I e l'agenzia ne approva solo tra i 15 e i 18. Con

un fondo di 125.000 dollari a progetto, i ricercatori hanno nove mesi per fare «delle prime prove veloci per verificare se la cosa è davvero fattibile», spiega Derleth. Se non emergono ostacoli insormontabili, i ricercatori possono fare domanda per le sovvenzioni da 500.000 dollari della Fase II. «Questa è una delle proposte più difficili da scrivere – continua Derleth – con il tasso di accettazione più basso del settore aerospaziale. Ritengo che questi ricercatori siano il meglio del meglio».

Otto dei 47 progetti finanziati negli ultimi due anni e tre progetti selezionati per la Fase II hanno avuto a che fare con la propulsione avanzata. Ma per il NIAC ogni progetto è una scommessa azzardata, sperando che almeno qualcuno possa rappresentare davvero una forza nuova, che possa portare la propulsione in una direzione inaudita.

Il principio di inerzia

«La nostra non è stata un'indagine guidata dal genio e da un'intuizione profonda», racconta Woodward durante una videoconferenza in un giorno di febbraio. È insieme a Fearn nell'ufficio annesso che ora è diventato il loro comune quartier generale, dove una scatola di fazzoletti sta accanto a un paio di tenaglie. Uno schermo mostra l'ufficio di Fearn, ora vuoto, con una selva di altissimi scaffali di metallo sullo sfondo. Insieme (perché Fearn proclama che il progetto è di Woodward e quest'ultimo protesta con forza uguale e contraria), i due descrivono come potrebbe funzionare MEGA. Si parte dall'inerzia.

Per azzardare missioni spaziali verso altri sistemi solari, il carburante chimico non andrà mai bene

È un principio semplice, di cui facciamo esperienza tutti i giorni: la tendenza delle cose a continuare a muoversi nella stessa direzione in cui si stanno già muovendo, o a rimanere ferme se sono già ferme. Però gli scienziati non hanno una spiegazione solida per l'esistenza dell'inerzia. È semplicemente... una cosa che esiste. Alla fine degli anni ottanta del XIX secolo, il fisico austriaco Ernst Mach ebbe il barlume di un'idea: l'inerzia è il risultato di tutta l'influenza gravitazionale di tutta la materia dell'universo.

Così, tutto ciò che si trova nel motore di un mezzo spaziale subisce l'attrazione gravitazionale della materia vicina e anche di quella che si trova a miliardi di anni luce di distanza. E la massa di un oggetto cambia un po' ogni volta che esso accelera o decelera in relazione a tutta quella materia. Più o meno nello stesso periodo anche altri fisici, tra cui Benedict Friedlaender e August Föppl, ebbero simili idee relativistiche.

Ma fu Albert Einstein a chiamare questa idea «principio di Mach» dopo aver letto le precedenti riflessioni di Ernst Mach sull'argomento. In epoca più moderna, altri fisici hanno abbracciato la causa, tra cui il compianto Donald Lynden-Bell, che nel 1969 fu il primo a ipotizzare che al centro delle galassie ci fossero buchi neri supermassicci. Lynden-Bell rimase affascinato dall'idea quando era ancora uno studente e il suo relatore gli assegnò uno studio pubblicato nel 1953 dal fisico Dennis Sciama, che articolava la versione più completa dell'idea di Mach. Il lavoro di Sciama fu quello che ispirò anche Woodward. Lynden-Bell continuò a interessarsi all'idea per tutta la sua carriera, ma per lui era un progetto secondario; la sua filosofia di ricerca era quasi l'opposto di quella di Woodward: «Il nostro compito principale è fare una scienza semplice, seguire le estensioni immediate di ciò che è noto al fine di chiarire nuovi fenomeni», ha scritto nel 2010. «Non dovremmo passare il tempo a cercare di affrontare grandi problemi che rischiano di essere fuori dalla nostra portata».

Woodward non è d'accordo, dato che si attiene piuttosto alla logica del «chi non risica non rosica», e quindi ha continuato a cercare di applicare il principio di Mach ai motori dei mezzi spaziali. Marc Millis, ingegnere già a capo del programma Breakthrough Propulsion Physics della NASA, ritiene che l'idea sia promettente. «A differenza di altre ipotesi, [il propulsore che sfrutta l'effetto Mach] si basa su questioni aperte della fisica», afferma.

L'idea di un propulsore basato sul principio di Mach funziona così: se deformiamo un oggetto, ne acceleriamo le parti interne (immaginiamo di accartocciare un pezzo di carta: quando lo schiacciamo, ne stiamo muovendo le parti) e se acceleriamo qualcosa ne modifichiamo l'energia. In base alla rivelazione di Einstein che $E = mc^2$, se modifichiamo l'energia di qualcosa ne cambiamo anche la massa, e se cambiamo la massa di qualcosa produciamo un effetto anche sulla sua inerzia. E quando andiamo a toccare l'inerzia stiamo modificando il modo in cui quell'oggetto si relaziona con tutto il resto dell'universo.

Che cosa tutto questo voglia dire a livello pratico è difficile da determinare, ma Woodward e Fearn stanno provando a trasferire queste idee su un piano concreto. All'interno del loro sistema di propulsione spaziale c'è una pila di «dischi piezoelettrici» fissati tra loro, cioè pezzi di ceramica che si espandono e si contraggono (come pezzi di carta che vengono accartocciati e distesi) quando ricevono una scossa elettrica. Parte di questa accelerazione modifica l'energia interna dei dischi, che a sua volta ne modifica la massa: diventano più pesanti e più leggeri, a fasi alterne. Se si riesce a tirarli quando sono leggeri e a spingerli quando sono pesanti, si ottiene una propulsione, senza usare alcun tipo di carburante. «Immaginate di stare su uno skateboard e di avere un mattone da 4,5 chilogrammi legato al corpo con un elastico», ha scritto nell'aprile 2012 sul suo sito web Tom Mahood, un ex studente di dottorato di Woodward, per cercare di rendere la cosa più comprensibile. «Se lanciate il mattone lontano da voi, voi e lo skateboard vi muoverete in una direzione e il mattone andrà nella direzione opposta». Propulsione! L'analogia non è perfetta, fa notare Woodward, che però ammette di non essere mai riuscito a trovare una metafora fisica che abbia senso e allo stesso tempo sia del tutto corretta.

La cosa sembra un po' sospetta, e secondo certi ricercatori violerebbe il principio di conservazione della quantità di moto, ma alcuni studi (e con loro Woodward e Fearn) sostengono di no. Intanto l'idea ha attirato l'attenzione di Gary Hudson, presidente dello Space Studies Institute, un'organizzazione guidata in passato dal celebre fisico teorico Freeman Dyson. Nel 2013 il gruppo ha varato un programma chiamato Exotic Propulsion Initiative, i cui primi finanziamenti sono andati a Woodward e Fearn.

Presto Woodward ha iniziato a inviare copie del suo dispositivo a colleghi di altri laboratori perché potessero provare a replicare la propulsione ottenuta. Intanto Fearn e Lance Williams, che all'epoca era ricercatore presso la Aerospace Corporation, un centro di ricerca e sviluppo finanziato da fondi federali a El Segundo, in California, proponevano allo Space Studies Institute di organizzare un convegno sui sistemi di propulsione avanzata.

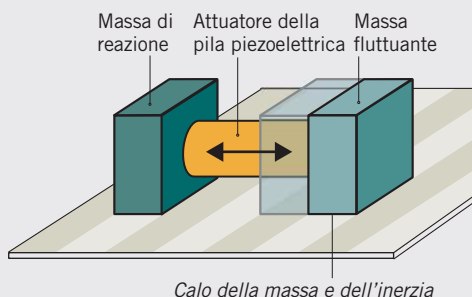
Williams vive in Colorado, e sapeva che era un bel posto dove fermarsi anche se tutti gli invitati avessero dato forfait, il grup-

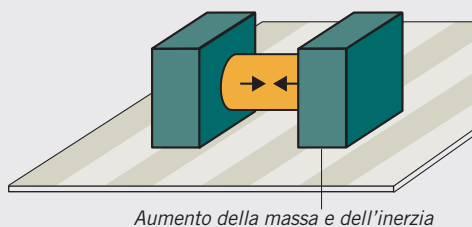
COME (FORSE) FUNZIONA

Propulsione basata sull'effetto Mach

Per spingere un mezzo spaziale a velocità maggiori di quelle che possono raggiungere i razzi tradizionali, i ricercatori stanno esplorando idee nuove e a volte strane. Una proposta prevede di sfruttare il cosiddetto effetto Mach, cioè l'idea che quando si imprime un'accelerazione a un oggetto si cambia leggermente la sua massa e che queste fluttuazioni di massa possono generare una propulsione (una spinta in una direzione) senza espellere propellente.

Fase 1

Due masse sono separate da una pila di dischi piezoelettrici, cioè pezzi di ceramica che si espandono e si contraggono quando si applica una corrente alternata. Quando la pila di dischi si espande, la massa a destra diventa più leggera e la sua inerzia diminuisce, il che rende più semplice spingerla avanti.

Fase 2

Quando la pila piezoelettrica si contrae, la massa fluttuante sulla destra diventa più massiccia e ciò ne aumenta l'inerzia, il che rende più difficile tirarla indietro. La massa costante a sinistra viene trascinata in avanti più di quanto la massa fluttuante a destra torni indietro, perciò il centro di massa di sposta in avanti.

Fase 3

Ripetendo questo ciclo, il centro di massa di tutto il sistema si sposta in avanti e accelera.

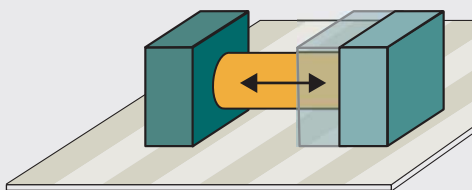



Illustrazione di Jen Christiansen

po ha quindi fissato l'appuntamento a Estes Park nell'autunno del 2016, quando i pioppi sui versanti ripidi delle montagne si rivestono del rosso fuoco/aranciato dei razzi (tradizionali). Il motto del convegno, «Sotterrare l'ascia di guerra», insisteva sulla collaborazione tra concorrenti, e l'incontro aveva anche una spilletta ufficiale con un'ascia e un badile incrociati.

Replicare i risultati

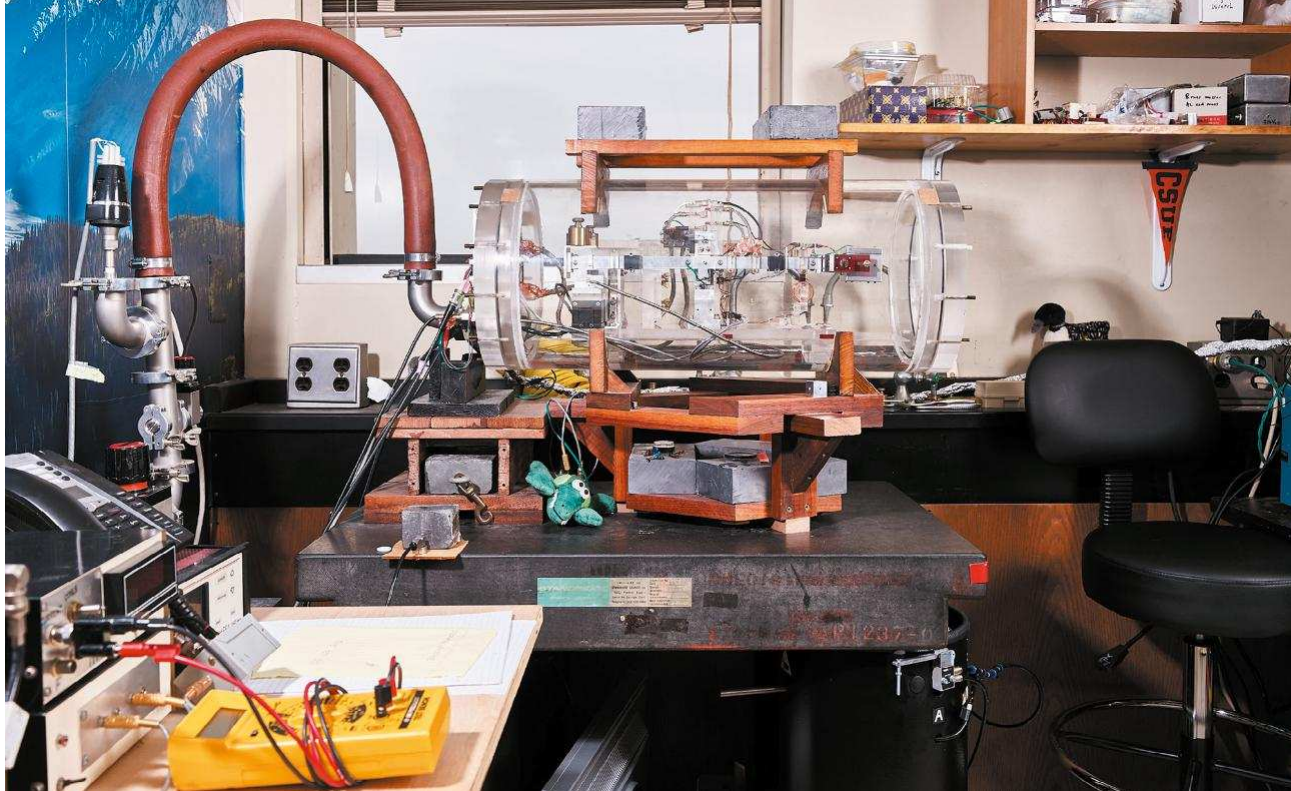
Il primo giorno, Hudson si è presentato ai partecipanti riuniti in una sala con pannelli di boiserie e lavagne bianche alle pareti. «In passato il nostro lavoro è stato saldamente radicato nell'ingegneria e nella fisica – ha detto – e naturalmente i sistemi di propulsione strani sono un argomento molto controverso». Tuttavia, ha continuato, quell'argomento lo affascinava da tanto tempo. Una volta lo scrittore di fantascienza Arthur C. Clarke gli aveva detto che se voleva andare via da questo pianeta e poi ritornarci aveva bisogno di una cosa: «Un fisico che ti dia una risposta chiara alla domanda "che cos'è l'inerzia?"». «Ho tenuto a mente quelle parole – ha continuato Hudson – e il primo fisico che ho incontrato che sia riuscito a darmi una risposta chiara è stato Jim Woodward».

Man mano che il convegno andava avanti, altri risultati sembravano confermare, almeno in qualche misura, i dati di Woodward e Fearn. Mostravano che l'impianto del MEGA produceva propulsione quando era in funzione e non quando era spento. Il terzo giorno davanti all'assemblea si è presentato Nembo Buldrini, dello studio di ingegneria austriaco FOTEC Research and Technology Transfer. Di solito si occupa di valutare gli effetti dei propulsori elettrici, ma qualche anno prima aveva ricevuto da Woodward un dispositivo basato sull'effetto Mach.

Buldrini ha mostrato un grafico dei suoi risultati accanto a quelli di Woodward e Fearn. «La cosa più evidente è la forma della curva», ha detto. In effetti, entrambe le curve mostravano un calo nel momento in cui il macchinario veniva acceso, una propulsione costante mentre era in funzione e poi un picco sfasato quando veniva spento. I dati relativi alla propulsione erano diversi per ordine di grandezza; forse, secondo Buldrini, si trattava di un problema di calibrazione. O forse no. (Woodward sottolinea anche che alcune differenze nell'attrezzatura potrebbero spiegare le differenze di grandezza.)

Altri due gruppi hanno presentato dati simili con modelli di propulsione simili. Martin Tajmar, del Politecnico di Dresda, in Germania, aveva soltanto risultati preliminari, ma George Hathaway, un ingegnere elettrico che ha un suo studio di consulenza, aveva più dati. Il suo laboratorio, ha affermato, aveva condotto gli esperimenti su tavole antisismiche per avere la certezza che i movimenti della Terra non influissero sui risultati relativi al viaggio al di là dei suoi confini. E i risultati relativi alla propulsione avevano tenuto.

Dopo le prime repliche dei risultati del laboratorio, il NIAC ha notato il progetto, e nel 2017 ha assegnato a Woodward e Fearn una sovvenzione di fase I. Naturalmente ciò non significa che la propulsione sia reale e non un errore sistemico, e se è reale non significa neanche che sia l'effetto Mach a causarla.

Nel 2018 Tajmar ha presentato uno studio condotto nell'ambito del suo progetto SpaceDrive, un'iniziativa volta a tentare di replicare, oppure a escludere, le proposte fantastiche (o fantasiose) sui sistemi di propulsione. In effetti il suo studio ha mostrato una propulsione con livelli insolitamente alti, il che significa che i puntini potrebbero non indicare affatto la propulsione, ma un errore o qualche altro fenomeno. Al convegno svoltosi nel 2018 presso lo

MEGA, il sistema di propulsione ad assistenza gravitazionale basato sull'effetto Mach, intende dimostrare una nuova tecnica per produrre la propulsione.

Space Studies Institute, un ingegnere del software di nome Jamie Ciomperlik ha presentato una simulazione in cui mostrava che le vibrazioni del sistema potevano camuffarsi da manifestazioni di energia.

Inoltre, a maggio 2019 Tajmar ha pubblicato on line un altro studio del progetto SpaceDrive, e quando ha eliminato gli altri effetti che potrebbero camuffarsi da propulsione non rimaneva alcuna propulsione visibile. «I nostri risultati mettono in dubbio la validità delle affermazioni sulla genuinità della propulsione generata dal propulsore basato sull'effetto Mach», afferma Tajmar. «Tuttavia sono necessarie ulteriori ricerche per una conferma definitiva». Woodward dice di essere convinto che il dispositivo non è stato configurato in modo corretto. Il gruppo di ricerca intende presentare nuovi dati quest'anno, e Tajmar afferma che anche se la propulsione si dovesse ripresentare, non crede che la teoria su cui si basa sia corretta.

Millis tende a concordare, sia sul fatto che i gruppi di ricerca potrebbero trovarsi di fronte a un falso positivo, sia sul fatto che, anche se così non fosse, non è detto che il dispositivo stia dimostrando l'effetto Mach. Eppure in un certo senso la teoria sottostante è meno importante della dimostrazione empirica. Come ha detto Lance Williams durante il convegno sulla propulsione nel 2016: «Se riuscite a far levitare una palla da cannone di fronte ai nostri occhi, non mi interessa la teoria».

«Il dubbio degli scettici è salutare, e l'unico modo per risolvere i dubbi sono le prove irrefutabili», afferma Millis, che recentemente ha passato tre mesi nel laboratorio di Tajmar alla ricerca di prove del genere. «Anche se i risultati sono stati replicati – continua – [la propulsione] potrebbe ancora rivelarsi una normale distorsione dovuta agli strumenti di misurazione. Oppure potrebbe essere davvero un fenomeno nuovo». Anche se la scienza per il momento neanche si avvicina a una risposta definitiva, i risultati ottenuti dal MEGA nella fase I hanno fatto abbastanza colpo sulla NASA da convincere l'agenzia ad assegnare al gruppo un finanziamento di fase II nel 2018.

Laser, antimateria ed energia nucleare

L'esperimento di Woodward e Fearn è il più strano tra quelli sovvenzionati dal NIAC sulla propulsione. E non tutti gli altri ricercatori che hanno ricevuto finanziamenti dal NIAC concordano che la strada giusta sia quella «strana».

Il progetto *Un'architettura di propulsione rivoluzionaria per le prime missioni interstellari* di Brophy punta le proprie speranze sui laser. Simili in qualche senso a quelli delle vele fotoniche di Lubin, i laser di Brophy saranno sparati dall'orbita, inviando fasci di luce a pannelli che, come i pannelli solari, li trasformeranno in energia elettrica. L'elettricità alimenterà un sistema di propulsione pieno di litio: la corrente elettrica separa alcuni elettroni dagli atomi di litio, che si ritrovano con una carica positiva, poi un campo elettrico li accelera e li proietta fuori dal mezzo spaziale, sul retro. Brophy intende far viaggiare questo mezzo a una velocità 20 volte superiore a quella del propulsore ionico usato per la missione Dawn (di cui Brophy stesso ha guidato lo sviluppo), raggiungendo una velocità di circa 200 chilometri al secondo.

Però il progetto è ancora un castello in aria. Il gruppo di ricerca non è sicuro di riuscire a puntare il laser con sufficiente accuratezza, né di poter costruire una schiera di laser così grande nello spazio e nemmeno di poter realizzare pannelli per la conversione della luce che riescano a generare i 6000 volt necessari. «Proprio per questo è uno studio perfetto per il NIAC», commenta Brophy. «[Gli esperimenti del NIAC si collocano] intenzionalmente proprio sul limite frastagliato tra ciò che è fattibile e ciò che non lo è».

Alcuni stanno cercando di abbandonare del tutto la via dell'elettricità. Un altro progetto NIAC punta a costruire un motore di antimateria per mezzo del «raffreddamento» di positroni, che hanno la stessa massa degli elettroni ma carica opposta. Allo stato naturale, queste particelle di antimateria sono più calde della superficie del Sole, perciò è difficile immagazzinarle o lavorarci. Invece una volta raffreddate si possono conservare e controllare, anche facendole scontrare con gli elettroni, come in questo progetto. La radiazione gamma che ne viene prodotta potrebbe ali-

mentare una reazione di fusione che poi farebbe avanzare il mezzo spaziale.

Un'altra idea intende intrecciare un fascio di neutroni e uno di fotoni laser in modo che le particelle non siano sottoposte a diffrazione, cioè non si disperdano, mentre viaggiano nello spazio. Il fascio di neutroni incanala i fotoni sottoponendoli a rifrazione, cioè piegandone la traiettoria, e il campo elettrico del fascio laser «intrappola» i neutroni. Il gruppo di ricerca sostiene che un fascio generato con un laser da 50 gigawatt sparato contro una vela installata su un'astronave potrebbe imprimere a una sonda da un chilogrammo un'accelerazione sufficiente per una missione di 42 anni fino al sistema stellare più vicino.

E poi naturalmente c'è il nucleare. Robert Adams, del Marshall Space Flight Center della NASA, ha un progetto NIAC che si chiama PuFF (Pulsed Fission-Fusion, cioè fissione-fusione pulsata), che unisce due strategie nucleari. «L'unico modo in cui siamo riusciti a sviluppare qualcosa di legato alla fusione è con un innesco a fissione», afferma; in altre parole, si usa la reazione di fissione, che è più facile da realizzare, per creare condizioni abbastanza estreme da innescare la fusione. Ma un innesco a fissione-fusione è molto simile a una bomba, perciò Adams ha iniziato a immaginare sistemi che non potessero essere riconvertiti a scopi criminali ed è giunto a un'idea chiamata Z-pinch. Se si genera una corrente elettrica in un plasma, in questo caso di litio, si può usare il campo magnetico così indotto per comprimere, o «pizzicare» (*pinch* in inglese), qualcosa, in questo caso un bersaglio di uranio e deuterio-trizio.

Non tutti i ricercatori che hanno ottenuto fondi NIAC pensano che la strada giusta sia quella «strana»

L'uranio compresso raggiunge la massa critica e la sua fissione fornisce abbastanza energia al deuterio-trizio da far partire la fusione. Questa genera neutroni, che prendono parte a loro volta alla fissione, facendo aumentare la temperatura e di conseguenza anche il tasso di fusione. L'esplosione in due fasi ha una forza pari a pochi chilogrammi di TNT; in altre parole, non basta a causare la fine del mondo ma è sufficiente, se applicata in modo continuo e con una serie di dispositivi paralleli, a far arrivare su Marte un mezzo di 25 tonnellate in 37 giorni (contro i circa nove mesi necessari con un motore chimico). Nel 2018, dopo averne fatto richiesta per cinque volte, Adams ha finalmente ottenuto una sovvenzione di fase II.

Per capire il problema principale che Adams deve affrontare, possiamo pensare a una merendina di pan di Spagna ripiena di crema. Se proviamo a schiacciarla in modo uniforme (l'obiettivo della fissione-fusione), è impossibile: il pan di Spagna schiaccia la crema del ripieno, che schizza fuori dai lati. Nel sistema PuFF, quegli schizzi sono energia che viene spinta via, in modo che non ne rimane abbastanza da alimentare la fusione. In passato questo problema ha bloccato irrimediabilmente la strada ai ricercatori. «Ci hanno rinunciato e hanno iniziato a esplorare altre strade», sostiene Adams. Ma nessuna di quelle strade ha portato a grandi passi avanti per la propulsione dei mezzi spaziali.

Una direzione nuova

Un parallelo storico del progetto di Adams ci insegna qualcosa a proposito di uno dei motivi per cui lo sviluppo delle forme di propulsione si è bloccato.

Tra il 1958 e il 1964 l'esercito degli Stati Uniti e la NASA hanno speso 11 milioni di dollari (93 milioni di dollari al valore attuale) su un progetto guidato da Freeman Dyson che aveva lo scopo di sviluppare un sistema di propulsione a energia nucleare chiamato Orione, molto simile al progetto PuFF. Il suo motto? «Marte entro il 1965, Saturno entro il 1970». Non era un progetto propriamente militare, ma era al limite di quello che la NASA considerava troppo azzardato, perciò entrambi gli enti erano titubanti nell'appoggiarlo. Alla fine fu annullato nel 1963, quando gli Stati Uniti firmarono il Trattato sulla messa al bando degli esperimenti nucleari, che rendeva illegali i test necessari. «È la prima volta nel corso della storia moderna che un importante possibilità di progresso della tecnologia umana è stata soppressa per motivi politici», affermò Dyson all'epoca.

Il merito, quindi, non è l'unico fattore che determina quali tecnologie vedano la luce. Tutto quello che inviamo nello spazio proviene dalla Terra, dove ci sono leggi, asce di guerra non sotterrate, principi fisici poco compresi e cose del tutto ignote che sembra troppo rischioso installare su un costosissimo mezzo spaziale. Questi sono alcuni dei fattori che portano alla proverbiale inerzia: la tendenza a usare sempre le stesse tecnologie e a proseguire sempre nella stessa direzione in cui stiamo già andando. Ma in qualsiasi momento una spinta esterna potrebbe far imboccare al settore una nuova direzione.

Il progetto MEGA è ancora al vaglio degli esperti, e c'è ancora tanta strada da fare prima che il concetto possa avere un'utilità, se mai la avrà. I dispositivi attuali offrono solo una spinta minima, misurata in micronewton: una mela esercita sul piano di lavoro della cucina una forza maggiore di vari ordini di grandezza, e la mela non si sta neanche avvicinando ad Alpha Centauri. Ma ogni spinta deve iniziare da qualche parte. Con il finanziamento di fase II, Fearn e Woodward sperano di aumentare la propulsione e di costruire diversi dispositivi in parallelo, in modo che insieme possano costituire qualcosa di utile. Poi, con fondi che sperano di riuscire a ottenere in seguito, lanceranno un mini-satellite completo di un mini-sistema di propulsione MEGA, e useranno quest'ultimo per cercare di modificare l'orbita del satellite, dimostrando così che l'effetto Mach può agire sul mondo reale.

Quest'anno il NIAC ha lanciato una nuova linea di sovvenzioni: i fondi della fase III, per un totale di 2 milioni di dollari. Le due sovvenzioni concesse nel 2019 sono andate a progetti relativi all'industria mineraria spaziale, che aiuteranno l'agenzia a raggiungere i suoi obiettivi per l'esplorazione del sistema solare. In futuro, però, i fondi potrebbero andare a progetti che guardano più lontano nello spazio e nel tempo: a progetti come MEGA, sempre che abbia dato risultati. Ma prima, sostiene Fearn, «la NASA vuole assicurarsi che questa non sia una curiosità su cui perdono tempo due tizi nella California meridionale». In altre parole, che sia pazzesca in senso buono. ■

PER APPROFONDIRE

On the Origin of Inertia. Sciama D.W., in «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», Vol. 113, n. 1, 1° febbraio 1953.

Experimental Null Test of a Mach Effect Thruster. Fearn H. e Woodward J.F., in «Journal of Space Exploration», Vol. 2, n. 2.

NASA Innovative Advanced Concepts Program (NIAC): **https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/niac/index.html.**

Verso Alfa Centauri (quasi) alla velocità della luce. Finkbeiner A., in «Le Scienze» n.585, maggio 2017.

CONSERVAZIONE

Promesse

infra

La società Rio Tinto estrae ilmenite nelle foreste lungo la costa sud-orientale del Madagascar, un ecosistema gravemente minacciato.

ante

Il colosso minerario Rio Tinto si era impegnato a migliorare l'ecologia dei suoi siti per l'estrazione di un minerale, l'ilmenite, in Madagascar, collaborando con gli scienziati. Poi però sono cominciati i problemi

di Rowan Moore Gerety

Rowan Moore Gerety è un giornalista e produttore radiofonico di New York City, autore di *Go Tell the Crocodiles: Chasing Prosperity in Mozambique* (The New Press, 2018). Il viaggio che ha fatto per raccontare questa storia è stato finanziato da Mongabay.org.

Nella foresta di Mandena, in Madagascar, il terreno è ricoperto di sabbia bianca e fogliame, e punteggiato dal blu elettrico delle capsule dei semi di *Ravenala*, alberi dalle foglie simili a quelle del banano che impediscono il passaggio della luce del Sole. Al calare della notte, i microcebi grigi emergono dalle loro tane nelle cavità degli alberi per cibarsi di insetti, fiori e frutti.

Nella stagione delle piogge, durante la quale dai tronchi si diramano i ciuffi di foglie delle piante di *Pandanus*, si formano pozze d'acqua: la base di ogni foglia forma un bacino abbastanza grande da ospitare piccoli banchi di girini finché non raggiungono la maturità, prima che, ogni aprile, le pozzanghere si prosciughino. Qui, rane della specie *Guibemantis annulatus*, così chiamate per le bande di colore bianco brillante che ne adornano le dita, trovano il luogo perfetto per allevare i propri piccoli, in posizione elevata rispetto ai possibili predatori. Cosparse di macchie, grandi come il pollice di un bambino, queste rane depongono le uova in un nido appiccicoso sull'acqua e restano a guardarle per quasi una settimana, finché i girini non cadono nella pozza e cominciano a nuotare.

Dall'interno, questo angolo di Mandena dà l'impressione di essere talmente esteso da potercisi perdere. Ma sopra la cima degli alberi la realtà diventa evidente. Un tempo la foresta si estendeva a perdita d'occhio. Ciò che ne rimane oggi ha le dimensioni di un parco cittadino: per percorrerla tutta basta meno di mezz'ora di cammino, stretta com'è tra una miniera da un lato e un villaggio in continua espansione dell'altro.

Il Madagascar si staccò dalla terraferma che oggi costituisce Africa e India quasi 100 milioni di anni fa. Nel tempo, questo isolamento ha fatto sì che l'evoluzione dotasse l'isola di una ricchezza ecologica senza uguali. Delle sue piante e dei suoi animali, quattro su cinque non si trovano in nessun altro luogo: un'ampia carrellata di personaggi in un vasto reticolo di nicchie simbiotiche altamente specializzate. Le 83 specie di piante del genere *Pandanus* che si trovano sull'isola, da sole, sono il luogo prescelto per la riproduzione di decine di specie di rettili e anfibi. Il rituale che unisce questo albero e questa rana specifici, tuttavia, oggi è confinato a una minuscola costellazione di frammenti di foresta sparsi sulla costa sud-orientale del Madagascar, come questo di Mandena. E due dei tre sprazzi di foresta in cui è ancora possibile trovare *G. annulatus* sono in una concessione che appartiene a Rio Tinto, una delle più grandi società minerarie del mondo.

Rio Tinto arrivò in Madagascar negli anni ottanta alla ricerca di ilmenite, un minerale usato per produrre biossido di titanio, che è alla base del pigmento bianco che troviamo in prodotti che spaziano dalle vernici alle plastiche, ai dentifrici. Alcuni pozzi esplorativi vicino a Tolagnaro, sulla punta sud-orientale dell'isola, trovarono quel che stavano cercando. I depositi di ilmenite che interessano Rio Tinto sono sotto i resti di dense foreste pluviali che un tempo crescevano sulle dune di sabbia lungo quasi tutta la costa orientale del Madagascar, formando una fascia continua che copriva circa 465.000 ettari di terra. Da quando, 2000 anni fa, l'isola fu colonizzata dagli esseri umani, queste foreste litoranee, come sono chiamate, si sono ridotte al 10 per cento (o anche meno) delle dimensioni originarie. Di conseguenza la concessione a Rio Tinto si intreccia con uno degli ecosistemi più minacciati della Terra.

Di norma, la scoperta di un tesoro sepolto sotto un ecosistema già vulnerabile significherebbe la morte di quasi tutte le creature che lo abitano. Ma nel 2004 i dirigenti di Rio Tinto, che ha il suo quartier generale a Londra, sono volati a Bangkok per il World Conservation Congress dell'International Union for Conservation of Nature, un importante punto di incontro per scienziati, ambientalisti e leader del mondo degli affari. Qui hanno svelato quello che doveva essere un ripensamento radicale dei rapporti tra industria estrattiva e mondo naturale. Si sono impegnati a cercare di contenere i danni ambientali delle estrazioni, e anche ad attivarsi per migliorare l'ecologia dei siti più sensibili. E avrebbero iniziato proprio con le concessioni minerarie nel Madagascar sud-orientale.

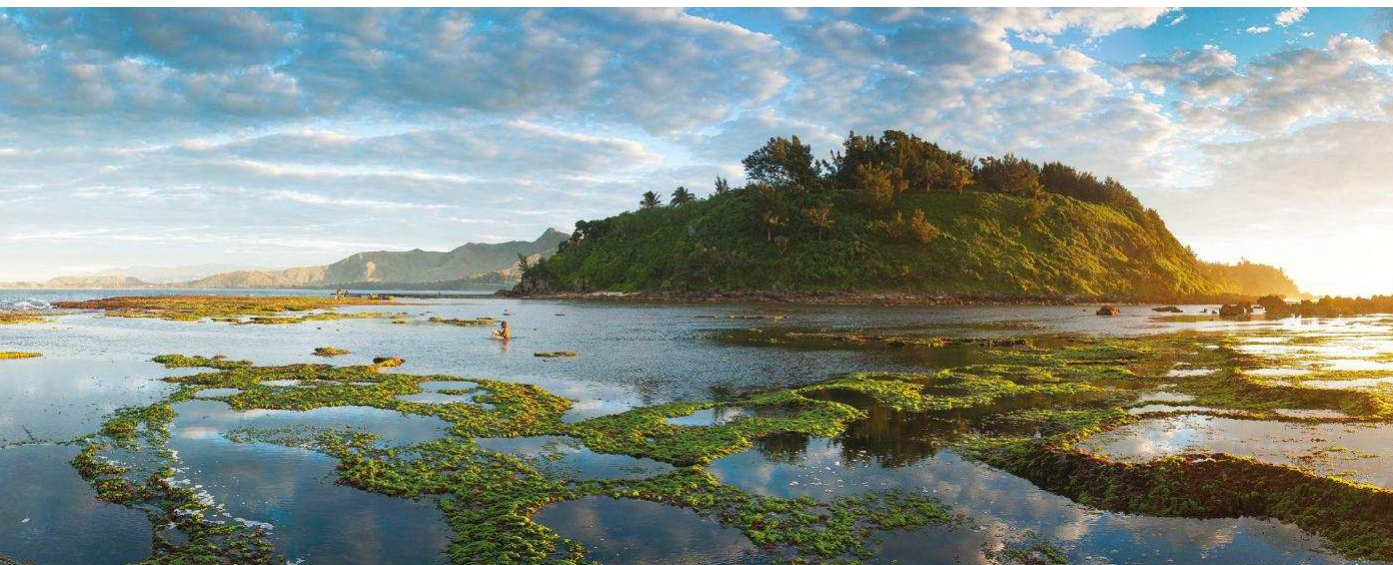
I conservazionisti hanno accolto la proposta con entusiasmo. Avevano motivo di essere ottimisti: Rio Tinto e il suo predecessore avevano già collaborato con scienziati del Missouri Botanical Garden per oltre dieci anni, finanziando ed effettuando indagini

Ed Kashi/Redux Pictures (*pagine precedenti*)

IN BREVE

Nel 2004 la società mineraria Rio Tinto ha promesso di migliorare l'ecologia dei suoi siti più sensibili. Avrebbe iniziato in Madagascar, dove estraeva un minerale, l'ilmenite.

Alcuni conservazionisti che lavoravano in Madagascar, isola ricca di specie che non si trovano da nessun'altra parte, ha collaborato con Rio Tinto per aiutarla a rispettare l'impegno preso.

Rio Tinto si è poi tirata indietro, sollevando questioni sulla possibilità di un'effettiva collaborazione tra industria estrattiva e conservazionisti ai fini della tutela dell'ambiente.

Il Sole sorge a Tolagnaro, in Madagascar. Sotto la foresta litoranea di questa regione si nascondono circa 70 tonnellate di ilmenite.

Martelet Christian/Getty Images

e studi botanici di nuove specie scoperte nella concessione. I dettagli erano ancora scarsi, e mancavano solidi parametri di riferimento ma, se Rio Tinto fosse andata fino in fondo la sua presa di posizione avrebbe avuto potenziali ripercussioni su tutta l'industria mineraria, costringendo le società estrattive a competere per i permessi sulla base dei loro programmi ambientali.

Come parte del programma di conservazione, Rio Tinto aveva creato un comitato per la biodiversità, costituito di ricercatori e manager di enti no-profit, che poteva aiutare la sua consociata locale, QIT Madagascar Minerals (QMM), a pianificare ed eseguire i lavori di conservazione ambientale ai margini di quella che prometteva di diventare una miniera enorme. Il governo del Madagascar sarebbe stato ricompensato con una partecipazione del 20 per cento in QMM, da cui avrebbe potuto guadagnare miliardi di dollari. Per gli scienziati del gruppo, entrare nel comitato era un salto nel buio: potevano aiutare a prevenire il peggio e sfruttare l'investimento di Rio Tinto per il bene dell'ambiente, ma sarebbero stati ritenuti anche loro responsabili se qualcosa fosse andato storto.

Non c'è voluto molto tempo. A pochi anni dalla creazione del comitato, i membri, preoccupati, hanno sollevato ripetutamente dubbi sul fatto che la QMM si stesse effettivamente comportando in modo da soddisfare gli obiettivi di conservazione. Quando, durante la grande recessione, i prezzi dell'ilmenite sono crollati, le priorità di Rio Tinto si sono spostate e nel 2016 la società si è sottratta alla promessa ambientalista, ponendosi invece il vago obiettivo di evitare di peggiorare troppo le cose. Oggi le miniere vicino a Mandena sono sul punto di provocare l'estinzione di questo hotspot di biodiversità. Per le persone che lo abitano, e per decine di specie endemiche come le rane *G. annulatus*, ora il destino è appeso al risultato di questo esperimento di lungo corso, un banco di prova per il ruolo dell'industria nella conservazione e per il ruolo che i conservazionisti possono avere nell'industria mineraria.

I buoni propositi

Nel suo stato naturale, l'ilmenite si accumula nei sedimenti profondi depositati da fiumi e torrenti che hanno cambiato corso molto tempo fa; forma una sabbia nera pesante che si separa dai minerali più leggeri, in superficie. Per estrarre il minerale, il primo passo consiste nel rimuovere dalle zone minerarie, con ruspe e motoseghe, ogni brandello di vegetazione, che è poi ammucchiato a formare gigantesche montagne di *compost*. Macchine per movimento terra scavano una trincea profonda come un palazzo di molti piani e più lunga di un campo da calcio; quest'ultima è poi riempita dall'acqua deviata da un fiume che scorre nelle vicinanze. Una draga preleva la sabbia fino a 18 metri di profondità e la pompa su una chiatta attraverso un'enorme cannuccia, all'interno della quale la gravità separa parte dell'ilmenite grezza da sabbia, terriccio e materiali più leggeri. Enormi «serpentoni neri», che altro non sono se non condutture temporanee, si incrociano lungo tutta la distesa di terreno, convogliando il liquame ricco di minerali in uno stabilimento per la lavorazione di colore verde luccicante, posto vicino all'acqua. Un'ulteriore quantità di ilmenite è estratta per separazione elettrostatica e, a questo punto, sabbia e terreno demineralizzati sono dispersi di nuovo nel paesaggio.

Rio Tinto ha scoperto l'ilmenite vicino a Tolagnaro nel 1986. All'epoca le foreste della regione erano già fortemente frammentate e degradate a causa dell'attività umana. Ma le prospezioni effettuate dalla società avevano portato nuove strade e un flusso di persone in cerca di lavoro, accelerando la deforestazione in corso per la produzione di carbone e la creazione di nuovi terreni agricoli necessari alla città in espansione.

Rio Tinto aveva stimato che la regione di Tolagnaro contenesse circa 70 milioni di tonnellate di ilmenite, abbastanza per rifornire il 10 per cento del mercato globale per più di un decennio, e aveva pianificato l'estrazione. La società aveva messo gli occhi su tre aree ricche di minerali lungo la costa, per un totale di circa 6000 ettari di terreno. L'estrazione sarebbe iniziata nel sito di Mandena, di 2000 ettari, per poi espandersi verso nord, a Sainte Luce, e più a sud, a Petriky. Sarebbe continuata fino all'esaurimento: secondo le proiezioni di Rio Tinto, ci sarebbero voluti circa sessant'anni dal giorno della prima produzione. Per quella data il Madagascar avrebbe perso 1665 ettari (ossia il 3,5 per cento) di quello che rimaneva della sua foresta litoranea.

Mentre la società mineraria esplorava la regione per misurare fino a che punto si estendevano i depositi di ilmenite, erano iniziati gli studi ambientali. Come parte dell'impegno, Rio Tinto aveva fi-

nanziato uno dei primi cataloghi botanici delle foreste costiere del Madagascar orientale; sapeva che avrebbe avuto migliori probabilità di assicurarsi i permessi di estrazione necessari se poteva dimostrare di aver fatto i dovuti controlli sulla portata dei danni che sarebbero stati causati dalle miniere. Il botanico Pete Lowry aveva lavorato con colleghi del Missouri Botanical Garden per raccogliere e documentare ogni specie vegetale trovata sul luogo. Decine delle piante inventariate erano sconosciute: «Ce ne siamo accorti quasi all'improvviso», racconta Lowry. «Molte specie sembravano crescere solo sulla sabbia bianca». Il gruppo stava delineando i dettagli di un ecosistema fino ad allora quasi sconosciuto alla scienza. Rio Tinto avrebbe poi stretto un accordo con prestigiosi scienziati di tutto il mondo, finanziando studi su oltre 40 specie trovate nella concessione mineraria e mai descritte prima.

Nonostante il sostegno alla ricerca ecologica in Madagascar, all'inizio degli anni duemila, globalmente, Rio Tinto si era guadagnata la reputazione di essere priva di scrupoli in un settore industriale già di per sé molto inquinante. In Papua Nuova Guinea, dove negli anni ottanta la società aveva aperto una gigantesca miniera di rame, le proteste provocate dalle discriminazioni nel trattamento che l'azienda riservava agli stranieri bianchi rispetto ai lavoratori locali avevano portato a un'interruzione forzata delle procedure di estrazione e contribuito a innescare una guerra civile. Trent'anni dopo, Rio Tinto ha lasciato il paese, ma si stima che per rimediare all'inquinamento provocato dalla miniera di Panguna sarà necessario un miliardo di dollari.

Queste erano le premesse problematiche che, nel 2004, avevano accompagnato i dirigenti di Rio Tinto a Bangkok, dove avevano annunciato un programma pilota di conservazione in Madagascar. La società l'aveva definita strategia a impatto positivo netto (NPI, *Net Positive Impact*) e si era impegnata a lasciare gli ecosistemi locali di Mandena, Sainte Luce e Petriky (tutti con una biodiversità particolarmente ricca) in condizioni migliori *a causa* della miniera, rispetto a quanto sarebbe successo in sua assenza. Nel 2005 Rio Tinto aveva svelato i particolari del piano. Nei tre siti, avrebbe evitato attività minerarie nei frammenti di foresta ben preservati; avrebbe intrapreso un ripristino ecologico senza precedenti delle aree deforestate dalle attività di estrazione; avrebbe investito in misure di compensazione alla perdita di biodiversità dovuta alla miniera agendo in molte altre foreste della regione. Il comitato per la biodiversità avrebbe aiutato la società a rispettare le promesse.

Per alcuni conservazionisti, però, l'accordo non era accettabile. Barry Ferguson, scienziato ambientale che all'epoca viveva a Tolagnaro, lo considerava una specie di *greenwashing* reciproco, in cui accademici con forti credenziali in conservazione ambientale potevano dare un bell'impulso alla propria carriera di ricercatori con studi finanziati da QMM. Altri osservatori dubitavano che un impatto positivo netto fosse un obiettivo raggiungibile da Rio Tinto in un'area così sensibile dal punto di vista ecologico. Dopotutto, erano decine le specie vegetali la cui esistenza era nota solo in aree situate all'interno della concessione. L'esistenza di una specie particolare di geco diurno, *Phelsuma antanosy*, un microscopico missile color verde neon, con righe rosse e sprazzi di turchese nei maschi, era ancora più precaria: confinato a un habitat probabilmente più piccolo di 10 chilometri quadrati, questo geco depone le uova su un'unica specie di *Pandanus*, che è anche la sola a ospitare gli insetti di cui si nutre.

Raggiungere un impatto positivo netto in Madagascar sarebbe stato costoso. Rio Tinto aveva calcolato che avrebbe dovuto lasciare sotto terra 1,2 miliardi di dollari di ilmenite per risparmiare i 624 ettari di foresta nelle zone da evitare e convertirli in aree protette. La ripopolazione delle foreste danneggiate e le misure di compensazione avrebbero inciso ulteriormente sui profitti.

1
2
Nei materiali promozionali, però, Rio Tinto citava spesso il *business case* dell'NPI, perché aveva bisogno di mostrare a governi e investitori che era la società migliore per intraprendere progetti a grande rischio sociale e ambientale. Secondo Lowry, «mettendosi dalla parte dei buoni, Rio Tinto avrebbe avuto un vantaggio commerciale». Lowry era diventato presidente del comitato per la biodiversità nel 2006. Inizialmente aveva sperato che la miniera in Madagascar, insieme ad altri due siti pilota di Rio Tinto in Mongolia e in Australia, avrebbero potuto aiutare a definire per l'industria estrattiva un nuovo modo di rapportarsi all'ambiente in un momento in cui le società erano preoccupate dalla possibilità che i rischi sociali e ambientali le escludessero da siti potenzialmente redditizi. «Questa era l'idea: "Il nostro è un brutto mestiere, tutti sanno che facciamo affari sporchi"», aggiunge Lowry. «"Che cosa dobbiamo fare per continuare anche in futuro?"». Nel 2008 Rio Tinto ha avviato le operazioni di estrazione in Madagascar.

Obiettivi abbandonati

Presto però il business case dell'impatto positivo netto si è scontrato con il business di una miniera redditizia. I mercati finanziari di tutto il mondo sono crollati proprio nei mesi prima che Mandena entrasse in produzione, nel dicembre 2008. Il prezzo delle azioni di Rio Tinto è precipitato e la società si è preparata a una contrazione della domanda. I primi carichi di ilmenite hanno lasciato il Madagascar per il Canada, dove sarebbero stati processati, nel maggio 2009; alla fine di quell'anno la domanda del minerale sarebbe calata del 20 per cento.

Franco Andreone

3

I siti minerari di Rio Tinto in Madagascar ospitano un gran numero di specie in pericolo, tra cui la rana *Guibemantis annulatus* (*1*), il geco diurno *Phelsuma antanosy* (*2*) e il lemure dal collare (*Eulemur collaris*) (*3*). Alcune specie vivono solo nelle aree interne alla concessione mineraria della società.

Konrad Wothe/Nature Picture Library

Per un po' Rio Tinto ha mantenuto parte della sua promessa conservazionista, tenendosi alla larga delle zone designate come da evitare. Stare lontani da queste aree protette, però, non era sufficiente: le foreste continuavano a deteriorarsi per la mancanza di una gestione attiva e per l'invasione di disboscatori in cerca di legname per vari usi. Il comitato per la biodiversità era preoccupato del fatto che la società non stesse potenziando di conseguenza l'impegno conservativo. «L'estinzione delle specie è il rischio principale che corre QMM», ha segnalato il comitato nel 2010.

Da qui in poi, la prospettiva conservazionista ha iniziato a deteriorarsi. Tra il 2010 e il 2012 QMM avrebbe dovuto fare progressi sostanziali nelle aggiunte al manto forestale con interventi di ripristino. Gli stessi dati delle analisi incrementali condotte dalla società mostravano che la deforestazione si era già portata via una regione quasi altrettanto estesa dell'area protetta di Mandena. A questo ritmo, un frammento particolarmente importante, a Sainte Luce (che ospitava quattro delle sette specie gravemente minacciate di estinzione presenti nell'area di competenza di QMM), si sarebbe ridotto da oltre 200 ettari a meno di 50 entro il 2024. Nei verbali degli incontri del comitato per la biodiversità, gli avvertimenti erano diventati più pressanti: «IL RAGGIUNGIMENTO DELL'NPI CORRE RISCHI ENORMI», avevano scritto nel 2012, sostenendo che QMM era ormai a corto di modi per compensare i danni che sarebbero stato provocati in futuro dalla miniera.

Intanto il bilancio della società era stato rosicchiato da problemi tecnici in Madagascar e da un costoso investimento sbagliato in Mozambico, dove Rio Tinto aveva pagato eccessivamente la propria quota di un'enorme nuova miniera di carbone; di conseguenza c'erano stati tagli dei costi in tutti i settori della società. Sebbene il finanziamento destinato al programma ambientale non fosse stato ridotto, sembrava comunque che non ci fossero più molte speranze di raggiungere un impatto positivo netto. Si erano persi mesi, durante i quali Rio Tinto aveva spinto QMM ad assumersi più responsabilità e a sostenere il lavoro con budget proprio.

Anche mentre la draga divorava senza sosta gli altri frammenti di foresta a Mandena, nell'area protetta QMM era riuscita a contenere la deforestazione, riducendola quasi a zero. Mandena, però, è di gran lunga il sito più facile da gestire dei tre, e il meno importante per la biodiversità. Nel 2015 il Biodiversity Action Plan della QMM aveva annunciato che per raggiungere l'NPI bisognava fermare subito degrado e deforestazione nelle aree di compensazione e nelle zone da evitare a Petriky e a Sainte Luce e rallentare radicalmente la perdita di foreste nelle aree di compensazione circostanti la miniera.

Alla fine, nel 2016, Rio Tinto ha abbandonato ufficialmente l'NPI come obiettivo aziendale. Un suo rappresentante ha incontrato il comitato per la biodiversità di QMM per presentare un nuovo standard ambientale dell'azienda che avrebbe dovuto sostituire l'impatto positivo netto, definendolo «minimizzare l'impatto residuale». Che cosa voleva dire, esattamente?

«Il concetto era privo di una vera e propria sostanza», ricorda Lowry. Il massimo che Rio Tinto si era spinta a dichiarare pubblicamente era che la risposta è *site-specific*, dipende dal luogo: i singoli progetti possono definire e finanziare la propria gestione ambientale fino ad avvicinarsi all'impatto positivo netto e, se lo desiderano, raggiungerlo.

Jörg Ganzhorn, ecologo dell'Università di Amburgo, in Germania, che aveva collaborato con Rio Tinto e QMM per oltre dieci anni, era sbalordito. «Avrei capito se, come industria mineraria, Rio Tinto non avesse parlato di raggiungere un impatto positivo netto relativamente alla biodiversità. Non è il suo compito», commenta. Ma nessuno aveva costretto la multinazionale a pubblicizzare questo standard sul proprio sito web, né a far volare il suo CEO da una parte all'altra del globo, a tutti i convegni sull'ambiente, per parlare del programma rivoluzionario della società. Fare tutto questo e poi abbandonare l'NPI? «È stato questo il momento in cui ho deciso di andarmene», conclude Ganzhorn. Quell'ottobre, Ganzhorn, Lowry e gli altri due scienziati che ancora lavoravano come consulenti della Rio Tinto in Madagascar hanno rilasciato una dichiarazione in cui troncavano i rapporti con la società.

Poco tempo dopo, in risposta alle dimissioni dei membri del comitato, i manager di Rio Tinto hanno fatto circolare un documento in cui le hanno presentate come una decisione presa di comune accordo «per dare una rinfrescata agli obiettivi e al focus del gruppo». Sarebbe stato costituito un comitato rinnovato e migliorato, il cui lavoro, secondo la dichiarazione, sarebbe stato impostato con l'aiuto dei membri del precedente. Lowry era l'unico, tra i membri del vecchio comitato, ancora disponibile a essere coinvolto, nonostante la società avesse abbandonato l'impegno nei confronti della conservazione ambientale. «La posta in gioco è ancora alta – commenta Lowry – se non partecipo a questo comitato non ci sarà nessun legame con il lavoro che è stato fatto negli ultimi 20 o 25 anni».

Le voci del posto

Nel luglio 2017, insieme a due membri del settore ambientale di QMM, ho partecipato a un tour di Mandena, dove quella che un tempo era una costellazione di campi immensi, frammenti di foreste e zone umide sta lasciando il posto agli angoli aguzzi e alle linee rette di un sito industriale. Un gheppio del Madagascar era appollaiato su una staccionata. Dove era passata la draga, sulla distesa di

sabbia, erano disseminati filari di eucalipti e acacie in stadio giovanile, che si incrociavano a formare un reticolo. QMM sperava che, con il tempo, questi alberi avrebbero costituito una fonte di legno e di carbone per le comunità che, al momento, dipendono dai frammenti di foresta destinati a diventare ben presto parte della miniera. Appena dietro il suo quartier generale, QMM gestisce un vivaio che rifornisce di acacie ed eucalipti, insieme ad altre piante native che la società usa in esperimenti mirati al ripristino di 675 ettari di foresta al fine vita della miniera, nel 2065.

Vicino a una *dépendance*, una famiglia di apalemuri grigi (*Hapalemur griseus*) masticava germogli di bambù mentre Faly Randriatafika, che supervisionava il lavoro ambientale di QMM, camminava tra le file di alberelli disposti su vassoi di plastica. Ci ha indicato un esemplare di 8 centimetri di *Eligmocarpus cynometroides*, una palma affusolata dai semi a forma di pugno, che ha una ventina di esemplari in natura, tutti a Petriky. «Questa pianta fa molta fatica a germinare: su 500 frutti, a volte si ottengono solo 20 semi», ha commentato Randriatafika. «Senza QMM, senza questo progetto, la specie sarebbe scomparsa».

Lisa Gaylord, all'epoca *manager* di Rio Tinto per le relazioni pubbliche, le comunità e lo sviluppo sostenibile, ha fatto un commento analogo, più in generale sul destino delle foreste litoranee circostanti la miniera di QMM. Nell'ufficio di Tolagnaro, Gaylord mi ha mostrato una presentazione al computer sui cambiamenti nel manto forestale attorno a Sainte Luce nell'ultimo decennio. Le chiazze di verde, anno dopo anno, si riducevano come banchi di sabbia che scompaiono con l'alta marea. Le implicazioni erano ovvie: a prescindere dalla miniera, presto agricoltura e produzione di carbone si sarebbero portate via quel poco di foresta che restava. «Potremmo non esistere nemmeno e, te lo assicuro, tutto il corridoio forestale scomparirebbe lo stesso», ha concluso Gaylord. «Scomparirà. Questa è la direzione in cui va il Madagascar».

Eppure, non c'è dubbio che la miniera stia mettendo a dura prova non solo foreste, piante e animali, ma anche gli esseri umani. In cima a una collina sopra la zona mineraria di Mandena c'è un villaggio che ho raggiunto percorrendo una stretta strada sterrata nota come «strada vecchia», situata a meno di mezzo chilometro, verso l'interno, dalla comoda strada asfaltata costruita da QMM per suo uso privato. Lo *chef fokontany*, il «capo» locale, Francis Maka Teodorik, ha riunito dieci vicini per parlare insieme nella sua casa; ci siamo seduti sui tappeti tradizionali fatti di *mahampy*, un tipo di canna raccolta nelle zone umide che costellano la costa. Per lungo tempo il mahampy intrecciato è stato la principale fonte di reddito per le donne locali; com'è accaduto al legname, usato per costruire e come combustibile, ce n'è sempre meno.

QMM ha finanziato l'allestimento di un appezzamento dimostrativo in cui ha ripristinato l'ambiente delle zone umide e organizza sessioni di formazione per incoraggiare le donne locali a raccogliere il mahampy in modo sostenibile, tagliando la canna sopra la radice. Eppure, secondo Teodorik e i suoi vicini tutti questi sforzi sono in realtà volti a nascondere il vero impatto della miniera. Helenette Raverosaotra, madre di quattro figli e la cui casa di due stanze si affaccia sullo stabilimento di QMM per la lavorazione, ha raccontato che oggi ha bisogno di sei o sette viaggi, anziché di uno solo, per procurarsi un numero di canne sufficienti a intrecciare un tappeto che si vende per tre dollari, perché le zone umide attorno a Mandena sono state trasformate una dopo l'altra in miniera. «QMM ha già distrutto tutto il mahampy che usavamo per i tappeti», ha detto Fidéline Jine, che oggi trascorre il tempo a pescare gamberi di fiume per guadagnare una piccola parte di quello che guadagnava un tempo. «Le miniere hanno riempito di sabbia tutti i luoghi in cui prima cresceva il mahampy».

Gli agricoltori locali, le cui terre erano state inondate per creare un approvvigionamento idrico per la miniera, hanno un'ulteriore rimostranza. Per anni hanno protestato per il fatto di non aver ricevuto una compensazione equa per tutta la terra che hanno perso. Quando finalmente QMM ha accettato di calcolare di quanto terreno si era appropriata, le analisi della società hanno dato ragione ai contadini: QMM li aveva pagati per la perdita di 4 ettari, ma le terre espropriate erano oltre sei volte più grandi. Alla fine, QMM ha dato agli agricoltori tutto il dovuto.

Un nuovo inizio

Tutti sembrano essere d'accordo sul fatto che un ingrediente che manca nella partnership tra miniere e conservazione ambientale sia un controllo più attento da parte del governo. Secondo Jocelyn Rakotomalala, a capo di una ONG di Tolagnaro chiamata Saha che collabora ai progetti sociali di QMM che coinvolgono le comunità locali, «le industrie estrattive potrebbero impegnarsi di più nella conservazione, se solo lo Stato fosse più esigente».

Spesso Rio Tinto ha descritto il suo impegno nei confronti di un impatto positivo netto come un fattore fondamentale per ottenere l'approvazione del progetto; come ha sottolineato il direttore provinciale per le attività estrattive di quella regione, Haritiana Ravelojaona, l'accordo firmato dalla società con il governo non richiedeva però niente del genere. «Prendiamo per esempio le compensazioni. Si tratta in tutti i casi di impegni volontari», ha aggiunto Ravelojaona, che ha proseguito raccontando che a Sainte Luce, dove gli abitanti hanno ripetutamente protestato per aver perso l'accesso alle piccole aree protette create dal progetto, «non sono più affari di QMM. Ora tocca allo Stato, se decide di proteggere quella regione, soddisfare le richieste della comunità dopo la restrizione degli accessi».

Frank Hawkins, oggi a capo dell'ufficio di Washington dell'International Union for the Conservation of Nature, è stato uno dei primi scienziati coinvolti con QMM. Oggi pensa che la società abbia «fallito miseramente» per quanto riguarda i risultati sociali e ambientali. Aggiunge però che si farebbe ancora coinvolgere se oggi il processo ripartisse, perché l'alternativa più probabile a Rio Tinto, secondo lui, non sarebbe l'assenza di miniere, ma una miniera costruita con protezioni ambientali terribilmente inadeguate. Nella città di Butte, negli Stati Uniti, nel 2016 migliaia di oche delle nevi sono morte quando a causa di una tempesta sono finite in un bacino artificiale inquinato, residuo di una miniera di rame a cielo aperto che aveva cessato le operazioni decenni prima. Nel delta del fiume Niger, la ricerca petrolifera ha causato ogni anno, per cinquant'anni, perdite equivalenti a quelle della petroliera *Exxon Valdez*. «La triste verità è che l'industria estrattiva non fa alcuna fatica a negoziare ottimi affari, perché si parla sempre di un sacco di soldi», spiega Hawkins.

L'industria estrattiva non fa alcuna fatica a negoziare ottimi affari, perché si parla sempre di un sacco di soldi

Nella penisola di Ampasindava, nel Madagascar nord-occidentale, funzionari pubblici di alto livello sono sembrati ansiosi di approvare i permessi per una miniera di terre rare a una società sot-

Alcune donne raccolgono il *mahampy*, un tipo di canna che cresce nelle zone umide lungo la costa. Il mahampy è poi ricoperto di argilla e fatto essiccare prima di essere intrecciato. Nei villaggi vicino a Mandena, uno dei siti minerari di Rio Tinto, il mahampy intrecciato è stato per lungo tempo una delle principali fonti di reddito, ma oggi ce n'è sempre meno, via via che le zone umide si riempiono di sabbia proveniente dalla miniera.

Ed Kashi/Redux Pictures

to inchiesta per reati finanziari dopo che la stessa società, grazie un'attività di *lobbying*, era riuscita a far ridurre l'area di una zona protetta situata nelle vicinanze. Nel sud-ovest dell'isola, un'azienda australiana inizia a sviluppare un'altra grande miniera di ilmenite, che contribuirà a inasprire la scarsità d'acqua in un ecosistema arido già affaticato dalle pressioni di siccità e deforestazione.

Sono in pochi a credere che il governo del Madagascar abbia la volontà politica di contrattare con i soggetti interessati concessioni minerarie più rispettose fin dall'inizio. Hawkins vorrebbe che i contratti nel settore estrattivo fossero negoziati nel contesto di piani regionali più ampi, così che operatori turistici o associazioni dedicate alla conservazione ambientale facessero da contrappeso, sostenendo una visione più ampia dello sviluppo del paese.

Lowry, da parte sua, è turbato dal constatare che lo stratagemma dell'impatto positivo netto di Rio Tinto non sembri aver innescato tra le società estrattive una nuova ondata competitiva per la gestione dell'ambiente. In Africa, i segnali più incoraggianti di un miglioramento nelle politiche ambientali del settore minerario sono sorti alla vecchia maniera, perché derivano da azioni dei governi. Ciad, Sudan, Niger e Gabon, per esempio, hanno adottato misure punitive nei confronti di SINOPEC e China National Petroleum Corporation, due giganti del petrolio controllati dal governo cinese, per le modalità di gestione dell'inquinamento e dello sfruttamento. Lo Zambia ha adottato la linea dura con le attività di estrazione del carbone soprattutto in risposta alle proteste locali contro condizioni di lavoro e inquinamento. Poco dopo la mia visita in Madagascar, nel 2017, le autorità hanno organizzato un viaggio per un accertamento dei fatti in un'area remota della concessione di Rio Tinto, per indagare sulle proteste delle comunità locali contro la società; queste proteste hanno ottenuto dal governo una reazione ben più significativa di quanto fosse riuscito a fare il comitato per la biodiversità con la sua lettera di dimissioni.

Tuttavia, che quella reazione porti a qualche misura degna di nota è ancora da vedere. Rio Tinto ha riconosciuto che l'attività mineraria a Mandena ha invaso una «zona di rispetto» intorno a un lago che fornisce mahampy e acqua potabile alle comunità del circondario, aumentando i rischi che i residui radioattivi provenienti dall'estrazione di ilmenite possano filtrare nel bacino idrico. L'ammissione è arrivata solo dopo due anni di insistenze da parte di una *charity* inglese che opera nell'area, l'Andrew Lees Trust, che per confermare la propria tesi ha dovuto commissionare uno studio a un geofisico. È poi emerso che l'autorità per il controllo ambientale del Madagascar, il National Office for the Environment (finanziato dai pagamenti delle concessioni minerarie, come quella di QMM), sapeva della falla da almeno un anno. L'autorità ha deciso di non adottare nessuna misura di regolamentazione.

Quando si tratta di grandi progetti minerari, sembra che gli impegni più affidabili siano quelli presi quando c'è di mezzo del denaro. In Mongolia, dove l'International Finance Corporation (IFC) possiede una fetta del progetto di Rio Tinto, l'impatto positivo netto è ancora valido, in gran parte perché legato agli standard di prestazione in tema di tutela ambientale della stessa IFC. Altrove, in Madagascar, alcuni accordi ambientali più riusciti tra settore privato e comunità locali sono nell'ambito del settore ittico, dove c'è un legame più chiaro tra i consumatori finali in Europa e le conseguenze ecologiche delle loro decisioni di acquisto.

Nonostante tutto, Lowry non rimpiange la sua decisione di lavorare con Rio Tinto, anche dopo aver visto il collasso dell'NPI come modello aziendale globale. «Penso che oggi QMM si trovi in una situazione molto migliore rispetto a quella in cui sarebbe stata, in termini di responsabilità ambientale e sociale, se non ci fosse stato alcun comitato», ha commentato lo scienziato. Nel 2018, Lowry ha deciso di unirsi all'appena nato comitato manageriale per la biodiversità e le risorse naturali per provare a mantenere qualche continuità con il lavoro del gruppo precedente. In un certo senso, è stato convinto a farlo dalla marcia indietro di Rio Tinto. Con QMM, se non altro, le decisioni sulla conservazione non saranno prese a Londra; dalla sua sede di Tolagnaro, le foreste non sono un concetto astratto. ■

PER APPROFONDIRE

Conservation Status of Vascular Plant Species from the QMM/Rio Tinto Mining Area at Mandena, Tolagnaro (Fort Dauphin) Region, Southeast Madagascar. Lowry P.P. II e altri, in «Madagascar Conservation & Development», Vol. 3, n. 1, pp. 55-63, dicembre 2008.

Madagascar: Rio Tinto Mine Breaches Sensitive Wetland. Carver E., in «Mongabay», pubblicato on line il 9 aprile 2019. **https://news.mongabay.com/2019/04/madagascar-rio-tinto-mine-breaches-sensitive-wetland.**

Salvare l'Eden. Nuwer R., in «Le Scienze» n. 575, luglio 2016.

di Paolo Attivissimo

giornalista informatico e studioso
della disinformazione nei media

Un’arma inumana contro il cancro

Un tragico episodio di guerra chimica avvenuto sul suolo italiano ha avuto un risvolto inaspettato

Poche scoperte scientifiche sono universalmente condannate quanto le armi chimiche, ritenute talmente inumane da essere bandite, almeno dal punto di vista formale, addirittura in tempo di guerra, come se gli altri modi di ammazzare fossero fulgidi esempi di civiltà e cavalleria. Ma c’è una storia, forse poco raccontata, che vale la pena considerare.

È il 2 dicembre 1943. A Bari, che a questo punto della seconda guerra mondiale è sotto il controllo degli alleati, un’incursione massiccia di bombardieri della tedesca Luftwaffe devasta a sorpresa le tante navi militari attraccate nel porto. Vengono affondate 17 navi da trasporto, e altre otto subiscono danni gravi. È un colpo durissimo per la logistica degli alleati, perché il porto di Bari è strategico: una Pearl Harbor italiana. I morti, fra civili e militari, sono almeno 1000, ma il numero esatto non è calcolabile per via del particolare carico di una delle navi statunitensi distrutte, la *John Harvey*.

In gran segreto, infatti, a bordo di questa nave ci sono circa 5000 tonnellate di bombe all’iprite: un devastante agente chimico tossico e vescicante, usato per la prima volta dall’esercito tedesco durante il primo conflitto mondiale. Le bombe sono state preparate perché si teme che i nazisti, alle strette, useranno le armi chimiche, e gli alleati vogliono essere pronti a rispondere.

Ignoto per molto tempo

L’esplosione della *John Harvey* spande iprite nel porto e sulla città. La sostanza si mescola con la nafta uscita dalle navi e forma sull’acqua un velo silenziosamente mortale. I marinai feriti che hanno tentato di mettersi in salvo gettandosi in acqua arrivano negli ospedali con le divise ancora impregnate, che emanano vapori letali senza che nessuno se ne accorga. Poche ore dopo iniziano a morire in modo apparentemente inspiegabile.

Solo un numero molto ristretto di medici militari riconosce con sconcerto i sintomi dell’iprite, tuttavia gli ufficiali alleati impongono il segreto, parlando di «dermatiti»: non si deve sapere che c’erano armi chimiche pronte all’uso su quella nave, perché non si vuole allarmare la popolazione e si teme che una rivelazione di questi preparativi possa legittimare un uso di armi analoghe da parte del regime nazista.

Questo tragico episodio di guerra chimica sul suolo italiano resterà ignoto fino alla fine degli anni sessanta, quando trapelerà in un saggio su una rivista dell’istituto navale statunitense; ci vorranno altri anni prima che la verità sia pubblicata anche in Italia.

Morti non vane

Il colonnello e medico Stewart Alexander, inviato a Bari dal presidente statunitense Dwight D. Eisenhower subito dopo il disastro, preleva dalle vittime numerosi campioni di tessuto, che diventano parte di una ricerca segreta sugli effetti delle armi chimiche. Grazie a questa ricerca, portata avanti negli Stati Uniti, si arriverà alla creazione della mecloretamina, un derivato dell’iprite che ha proprietà antineoplastiche: sarà il primo farmaco chemioterapico. Prima di allora, nessuna sostanza aveva avuto effetto contro il cancro. Le basi dell’oncologia moderna, insomma, furono gettate anche grazie al sacrificio inconsapevole delle vittime di Bari.

Può sembrare immorale sfruttare dati medici ottenuti in circostanze così terribili, ma perlomeno in questo modo non si è trattato di morti vane. E il fatto che sia stato possibile ricavare del bene dall’agonia causata dagli agenti chimici creati per uccidere ci ricorda l’imprevedibilità e l’importanza della ricerca di base, quella in cui si investe senza avere pretesa di ritorni concreti immediati: si chiama ricerca proprio perché non si sa in anticipo cosa si troverà.

di Beatrice Mautino

biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti *Il trucco c'è e si vede* (Chiarelettere, 2018)

Questioni di colore

Come funzionano, e che origine hanno, le tinture usate per cambiare il colore dei nostri capelli

Come molte grandi scoperte della storia, l'origine delle tinture permanenti la dobbiamo a un errore. Siamo nell'Inghilterra del 1800 e più precisamente al London's Royal College of Chemistry nella classe del chimico tedesco August Wilhelm von Hofmann.

I suoi studenti avevano il compito di sintetizzare un composto e a William Henry Perkin era capitato il chinino, il noto farmaco per la malaria. Sulla carta, sarebbe stato sufficiente prendere una molecola molto simile al chinino, l'anilina, un derivato della lavorazione del catrame e ossidarla, cioè portarle via elettroni per trasformarla nel chinino. Per svolgere questo compito, Perkin prese il catrame di carbone contenuto nei serbatoi delle lampade usate all'epoca per illuminare la città e lo fece reagire con dicromato di potassio. In condizioni ideali, il giovane aspirante chimico avrebbe ottenuto il chinino. Ma nel suo laboratorio casalingo la reazione diede origine a un solido nero, in gergo un precipitato, segno che qualcosa non aveva funzionato.

Perkin, sconsolato, gettò via tutto e si mise a lavare la vetreria con alcool per apprestarsi a ripetere tutto da capo, quando vide che i residui del prodotto della reazione a contatto con l'alcool si trasformavano in un liquido brillante color malva. L'errore di Perkin si era trasformato in una scoperta rivoluzionaria: a soli 18 anni aveva appena prodotto la malveina o porpora di anilina, il primo colorante artificiale della storia.

Dalla lana ai capelli

Qualche anno dopo, Hofmann, recuperò terreno nei confronti dell'allievo e scopri che una molecola parente dell'anilina, la para-fenilendiamina esposta all'aria era in grado di tingere di marrone molti materiali differenti, inclusa la lana. Dalla lana ai capelli, il passo è stato breve e il primo a coglierlo fu un altro studente di chimica, questa volta alla Sorbona, il francese Eugène Schueller che nel 1907 riuscì a mettere a punto la prima tintura permanente per capelli, Auréole, diventata poi nel 1910 L'Oreal, «il miglior prodotto attualmente conosciuto». Una tintura permanente efficace deve riuscire a penetrare bene all'interno del capello e, soprattutto, non sfuggire una volta entrata. Come si fa? Il segreto è nelle due boccette che si trovano generalmente nelle confezioni. La prima è definita «crema colorante» e contiene ammoniaca (o molecole dall'azione simile) e precursori dei coloranti. Nel secondo contenitore, il «rivelatore», invece di ingrediente ce n'è fondamentalmente uno solo: l'acqua ossigenata.

Trappola per molecole

L'ammoniaca, grazie al suo pH basico, apre le cuticole del capello e permette la penetrazione dei coloranti. Subito dopo entra in gioco l'acqua ossigenata che guida le reazioni come un direttore d'orchestra. Inizia rompendo la melanina e quindi «decolorando» i capelli. Prosegue ossidando il primo gruppo di coloranti, gli intermediari primari, come la parafenilendiamina e creando la base per il colore finale. Finisce ossidando anche il secondo gruppo di coloranti, gli accoppianti, che andranno a legarsi ai primi creando il tono della colorazione (blu, rosso o giallo-verde). Il risultato di queste reazioni sono quindi molecole colorate che, per le loro dimensioni, rimangono intrappolate fra le maglie della cheratina e non riescono più a uscire rendendo la colorazione «permanente». Il trattamento finale con un balsamo dal pH acido conclude il lavoro, richiudendo le cuticole e rivestendo le fibre con ingredienti come oli o siliconi che proteggono il capello.

Reazioni chimiche complesse che mettiamo in atto ogni volta che decidiamo di cambiare il colore dei nostri capelli e per le quali dobbiamo ringraziare quello studente inglese che aveva sbagliato il compito.

di Dario Bressanini

chimico, divulgatore, gastronomo. Autore di *Contro natura* (Rizzoli, 2015), *La Scienza della Carne* (Gribaudo, 2016)

Dove conservare le uova

Quelle acquistate dai consumatori vanno tenute in frigo per evitare l'eventuale proliferazione della salmonella

Dovendo conservare a casa un alimento acquistato al supermercato, spesso manteniamo le stesse condizioni del punto vendita: le patate le acquistiamo a temperatura ambiente e così andrebbero conservate, stessa cosa per l'aglio. Il latte fresco, a differenza di quello UHT, lo troviamo refrigerato e dovremmo riporlo in frigorifero appena arrivati a casa.

E le uova? Di solito nei punti vendita le troviamo sugli scaffali a temperatura ambiente, ma sulla confezione è scritto «conservare in frigorifero dopo l'acquisto». Questo genera un po' di confusione nel consumatore, che si acuisce dopo una vacanza in paesi, come gli Stati Uniti, dove invece le uova nei supermercati sono sempre refrigerate. Come mai?

Attenzione alla condensa

La soluzione di questo apparente paradosso risiede nel regolamento (CE) n. 589/2008 dell'Unione Europea che spiega come in generale «le uova refrigerate lasciate a temperatura ambiente possono generare una condensa che facilita la proliferazione di batteri sul guscio e probabilmente il loro ingresso nell'uovo. È pertanto opportuno che le uova siano immagazzinate e trasportate di preferenza a una temperatura costante e che di norma non siano refrigerate prima della vendita al consumatore finale». Stabilisce quindi che le uova della categoria A, quelle dirette ai consumatori, non all'industria alimentare, non possono subire «alcun trattamento di conservazione e non sono refrigerate in locali o impianti in cui la temperatura è mantenuta artificialmente al di sotto di 5 °C.»

Ricordate che un frigorifero dovrebbe stare tra 2 °C e 4 °C. La legge quindi si preoccupa della condensa che potrebbe formarsi sul guscio nel tragitto tra il supermercato e casa, con la possibilità di creare un ambiente dove *Salmonella*, il batterio che più genera timori nelle uova, possa proliferare.

La legge stabilisce eccezioni: «Non sono considerate refrigerate le uova che sono state mantenute a una temperatura inferiore a 5 °C durante il trasporto, di una durata massima di 24 ore, oppure in un punto di vendita, per una durata massima di 72 ore». Altre volte alcuni supermercati le ripongono in scaffali al fresco, ma al di sopra di 5 °C. Arrivati a casa però è opportuno conservarle in frigo fino alla consumazione, sia per mantenere più a lungo la freschezza dell'uovo, sia perché l'eventuale *Salmonella* già presente all'interno dell'uovo potrebbe proliferare.

Pulizie dannose

Per lo stesso motivo la legislazione vieta ai produttori di lavare o pulire le uova: «In generale, è opportuno che le uova non siano lavate o pulite perché simili pratiche possono danneggiare il guscio, che possiede una serie di proprietà antimicrobiche e costituisce un'efficace barriera contro le contaminazioni batteriche. [...] Un altro motivo per cui le uova della categoria A non devono essere lavate è costituito dai danni potenziali alle barriere fisiche, come la cuticola, che possono verificarsi durante o dopo il lavaggio. Questi danni possono favorire la contaminazione batterica e la perdita di umidità attraverso il guscio, aumentando in tal modo i rischi per i consumatori, soprattutto se le successive condizioni di asciugatura e magazzinaggio non risultano ottimali.»

In paesi come gli Stati Uniti le regole sono diverse. Secondo il Department of Agriculture, il miglior modo per combattere il batterio *Salmonella* è lavare e sanificare le uova immediatamente dopo la deposizione. Questo processo però oltre a rimuovere gli eventuali contaminanti esterni, rimuove anche la cuticola protettiva lasciando l'uovo preda degli attacchi batterici, ed è quindi assolutamente necessario conservarlo in frigorifero fino ai negozi.

Più fresco, più freschezza. Oltre a impedire la proliferazione dell'eventuale *Salmonella* già presente, la conservazione in frigo mantiene più a lungo la freschezza delle uova.

johny007pan/iStock

L'arrivo di un gatto, un cucciolo di nome Arturo, spinge Rudy a ideare un problema basato sulla contrapposizione tra bianco e nero

Diversi ma uguali (e viceversa)

Un noto principio della meccanica asserisce che un dischetto che rotola su pavimento, non sottoposto a forze esterne, continuerà il suo tragitto rettilineo perdendo gradualmente energia per effetto dell'attrito, quindi rallentare e fermarsi, a meno che non ci sia un gatto nei paraggi. La precisazione finale non è solitamente necessaria nella casa dove abita Gaetanagnesi, perché la nera belva è troppo aristocratica per abbassarsi a simili trastulli volgari come l'inseguimento di oggetti rotolanti. Ciò nonostante, e benché la micia sia bene in vista sulla spalliera di una poltrona distante almeno cinque metri dall'incauto dischetto rotolante, questo viene subitaneamente rilanciato a velocità solo di poco subsonica attraverso il pavimento, con una rapidità e propulsione che può essere, nell'universo conosciuto, cagionata solo da una zampata d'origine felina.

«Ma che diavolo...», mormora Rudy.

«Che cosa mai...», gli fa eco Piotr.

Le mezze domande non fanno in tempo a essere completate perché la risposta, sotto forma di un cucciolo di gatto bianco, è già sbucato da sotto il divano.

«Già, scusatemi, non ho ancora avuto il tempo di avvertirvi», dice Alice, mentre con un gesto esperto della mano intercetta e cattura il micetto, ponendoselo in grembo: «Vi presento Arturo. Starà con noi per pochi giorni: è dei vicini che sono dovuti partire all'improvviso. Mi hanno chiesto se potevamo ospitarlo, e ho detto di sì.»

«Ma, ehm, hai chiesto anche il parere di...?»

«...di Gaetanagnesi? Ma certo che sì: prima di accettare glielo ho messo davanti, lei gli ha dato nell'ordine un'annusata, una leccatina sul muso e una sberla sulla testa, poi è tornata a dormicchiare. Se la conosco come la conosco, è il migliore dei benvenuti possibili.»

«Fantastico – fa Piotr – così adesso abbiamo una grossa gatta nera e un piccolo gatto bianco, anche se in via temporanea. La cosa mi farebbe pure piacere, se non fosse che questa congerie di attributi felini uguali e opposti rischia di far partorire qualche nuovo complicato problema nella testa di Rudy.»

«In effetti...», bisbiglia Rudy, caricando la pipa.

«Vedi, Treccia, vedi? È inguaribile! Basta un minuscolo alibi, un accenno di scusa, e...»

«In effetti – continua Rudy, a voce più alta e un po' più sprezzante – io stavo solo domandandomi che cosa fosse quel dischetto che... hai detto che si chiama Arturo, vero? Beh, quel dischetto che Arturo ha fatto schizzare verso la cucina.»

«Una pedina della dama, direi; ogni volta che voi due usate la scacchiera le lasciate in giro, e probabilmente adesso sono tutte, bianche e nere, sparse per la casa.»

Piotr sospira: «Ecco, torna di nuovo la contrapposizione bianco/nero... prevedo che un problema prenderà forma nel giro di cinque minuti al massimo.»

Illustrazione di Stefano Fabbri

«Doc, la pianti?», ringhia Alice: «Mi sembra che tu lo stia provocando, più che distrarlo.»

Rudy sorride, e giocherella con il micino agitandogli di fronte al muso il fiammifero spento con cui ha acceso la pipa.

«Va bene, accetto la provocazione. Bianco e nero, istinto giovanile e saggezza adulta; pedine della dama, che sono sempre equamente suddivise tra i due colori e... sì, in gruppi il cui totale è pari ma non è un numero quadrato. Possiamo aggiungere agli ingredienti anche questo fiammifero che era bianco prima che lo accendessi e che adesso è diventato nero, e... sì, diciamo che un problemino veloce si può costruire. Pronti?»

Alice guarda storto Piotr, che a sua volta abbassa gli occhi.

di Rodolfo Clerico,
Piero Fabbri e
Francesca Ortenzio

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve a novembre e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

IL PROBLEMA DI SETTEMBRE

Il problema del mese scorso era relativo ad «acquisti» ripetuti da parte della micia che, conoscendo la distribuzione di una certa quantità totale D di crocchette in N sacchetti, decideva di volta in volta se continuare ad acquistarne o meno; si chiedeva quali criteri seguisse per decidere. In una fase successiva, era la medesima gatta a decidere la distribuzione delle crocchette nei sacchetti, e si chiedeva quale strategia usasse nella definizione della strategia della distribuzione e del gioco.
In entrambe le fasi del gioco, il principio informatore principale sta nel fatto che la distribuzione più vantaggiosa per il giocatore acquirente è quella che prevede tutte le D crocchette in un solo sacchetto, lasciando gli altri $N - 1$ vuoti. Anche se abbastanza intuitivo, questo principio è dimostrabile solo con un complesso ragionamento induttivo, che tralasceremo. Su questa base, la «strategia di distribuzione» della fase 2 del gioco è presto definita; dal punto di vista della conduzione del gioco, per entrambe le fasi vale il principio che se, in un dato momento, è vantaggioso acquistare un pacchetto, allora deve continuare a essere vantaggioso anche se il pacchetto appena acquistato è vuoto; ergo, si deve valutare se continuare o meno gli acquisti solo dopo aver ottenuto qualcosa dall'ultimo acquisto. In particolare, se tutte le crocchette sono in un solo sacchetto, la spesa attesa dal giocatore per avere tutte le crocchette è data da:

$$\sum_{j=1}^{N} j \cdot \frac{1}{N} = \frac{N+1}{2}$$

E di conseguenza l'acquirente accetterà di giocare (ovviamente comprando pacchetti fino all'acquisto dell'unico con le N crocchette) solo se $D > (N + 1)/2$, con un guadagno atteso pari a $D - (N + 1)/2$ e si rifiuterà di giocare se $D \leq (N + 1)/2$.

«Scusami, Treccia; è vero, l'ho provocato un po', però non credevo che...»

«Adesso ti arrangi,» fa Alice, mentre si mette in spalla Arturo e lancia un muto ordine a Gaetanagnesi, che subito la segue verso il terrazzo: «Noi tre andiamo a goderci il Sole, tu goditi il problema.»

E prima che Piotr possa aprir bocca, incontra lo sguardo sornione e facondo di Rudy.

«Immagina, Doc: visualizza una griglia rettangolare di pedine della dama, disposte casualmente, ma con queste precise regole: innanzitutto, il numero delle righe deve essere pari; poi, ogni riga e ogni colonna devono contenere un ugual numero di pedine bianche e nere. Ci sei fin qui?»

«Beh, sì... ma non è meglio se raccolgo davvero le pedine sparpagliate da Arturo e...»

«Non serve: ci metteresti troppo tempo e poi si perderebbe in generalità...»

«Va bene. Anche il numero delle colonne dev'essere pari?»

«Mi prendi in giro? Ho appena detto che il numero di pedine nere e bianche deve essere uguale in ogni riga e colonna, come potrebbero le colonne essere dispari?»

«Giusto. È che pensavo che forse Alice ha bisogno di aiuto con il gattino, e...»

«Piantala. Adesso immagina i miei fiammiferi, e fai lo sforzo di considerarli nuovi o usati, o più semplicemente bianchi o neri. Piazza idealmente un fiammifero bianco come "ponte" tra ogni due pedine adiacenti bianche, e un fiammifero nero tra ogni due adiacenti nere. Intendo "adiacenti" solo orizzontalmente o verticalmente, non diagonalmente. Ok?»

«Sì, ma...»

«Dai, su, che abbiamo finito...»

«Va bene. Credo di aver capito le regole... mi sto immaginando qualcosa che somiglia a un labirinto...»

«Buon segno: significa che non hai messo bastoncini in diagonale e che hai tenuto conto della disposizione casuale delle pedine, fatte salve le regole esposte. Non ti resta che generalizzare, immaginare tutte le disposizioni possibili delle pedine bianche e nere che seguano le regole, e definire in quali casi servano più fiammiferi neri e in quali più fiammiferi bianchi. Facile, no?»

«Come sarebbe a dire "facile"? Un problema con un numero generico N di pedine e che richiede l'analisi di tutte le disposizioni possibili... sei tu che mi prendi in giro, adesso!»

«Ma no... tutto dipende dall'approccio. Scegli tu se attaccarlo con una nera e adulta logica razionale, come farebbe Gaetanagnesi, o con un approccio più istintivo, bianco e infantile, tale e quale ad Arturo. In fondo, sono sempre gatti entrambi, no?»

«Che vuoi dire con questo? Che ci si può arrivare in modi diversi, complementari o magari opposti?»

«Quello su cui vanno d'accordo questi due– dice Alice dalla terrazza – è che arrivata l'ora di cena. Aiutatemi a riempire le ciotole.»

Gli zombie delle razze umane

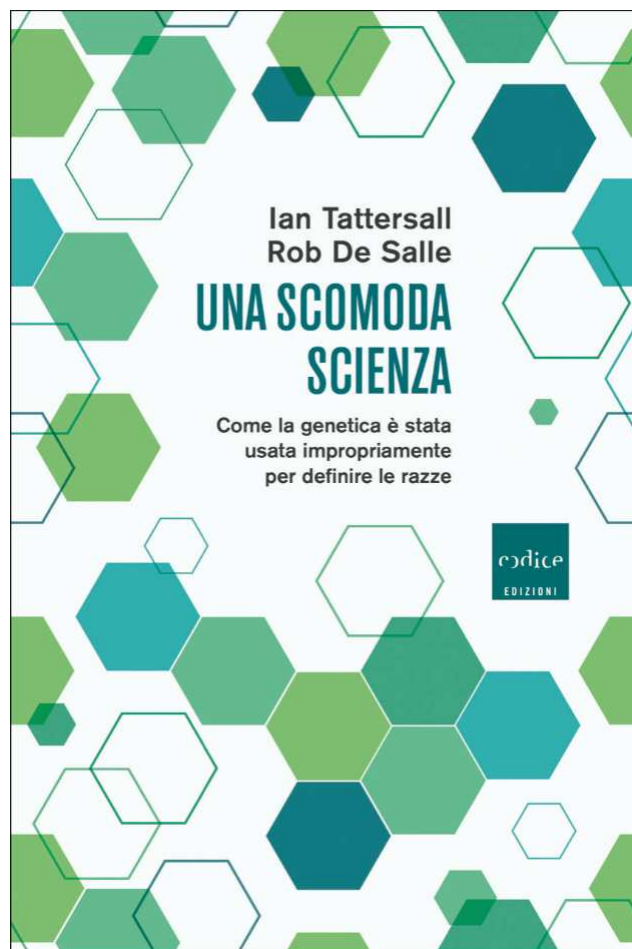
La scienza contro il mito della razza tornato pericolosamente in circolazione

Una scomoda scienza
di Ian Tattersall e Rob Desalle
Codice Edizioni, Torino, 2019, pp. 234 (euro 23,00)

Perché pubblicare, oggi, un ennesimo libro che smentisce l'esistenza delle razze umane come entità biologiche? Per mano poi di due autori che già nel 2011 ne avevano scritto uno su questo stesso tema? Non dovrebbe essere ormai assodato che la razza, nella nostra specie, è solo un costrutto sociale? Eppure, sostengono con ragione Rob DeSalle e Ian Tattersall, di un libro simile c'è bisogno. Perché i miti della razza stanno tornando a circolare, nel mondo scientifico come fra il pubblico. E non solo sui siti web più beceri legati alle nuove destre xenofobe, ma anche in casi clamorosi che hanno fatto discutere. Come il libro *Una scomoda eredità* pubblicato pochi anni fa da Nicholas Wade, già giornalista del «New York Times» (tradotto in Italia sempre da Codice nel 2015), a cui DeSalle e Tattersall fanno espresso riferimento fin dal titolo, per ribattere alle sue tesi nel testo.

Questo nuovo libro, in ogni caso, non è un mero rifacimento dei suoi vari predecessori. Perché genomica, antropologia e le altre scienze sulla cui base si è provato a dividere l'umanità in razze continuano a progredire, e a volte le nuove scoperte sono fraintese o interpretate in modo tendenzioso per cercare di riportare in vita il vecchio concetto. Così i due autori spiegano le idee di base sull'evoluzione e la classificazione delle specie e delle popolazioni, la loro genetica e come la si studia, e perché alcuni concetti e metodi utili per fare ordine fra le specie e chiarire le rispettive relazioni non siano traslabili tal quali alle popolazioni; dalla pretesa di farlo nascono molti equivoci. Tanto più quando si cerca di classificare in gruppi discreti la variazione fra gli esseri umani, come attestano i tanti tentativi che si sono succeduti senza mai giungere a una conclusione condivisa.

La seconda parte affronta le conoscenze giunte nel nuovo millennio, dal genoma umano agli studi sul DNA antico e ai metodi con cui si analizza la variazione genica umana. La trattazione è dettagliata e approfondita, un po' complessa per un lettore senza una certa conoscenza del settore, ma senz'altro di interesse per biologi, antropologi, medici e chiunque abbia un po' di dimestichezza con questi temi.

Entrare nel dettaglio degli argomenti scientifici, d'altra parte, era necessario per mostrare che, come afferma il capitolo finale, «Il signor Murray ha perso la scommessa». Charles Murray è lo scienziato che, recensendo con favore il libro di Wade, pronosticava che i critici ne avrebbero attaccato a testa bassa l'ultima parte: quella in cui, riconosciuta l'esistenza delle razze, si ricercavano in queste i motivi di alcune differenze di comportamento tra le persone. Il sottinteso era che chi nega l'esistenza delle razze umane lo faccia solo per ragioni di correttezza politica, per promuovere la sua visione egualitaria, e non abbia validi argomenti scientifici. DeSalle e Tattersall fanno l'esatto opposto: smontano i presupposti scientifici di fondo di Wade, sulla cui base struttura i suoi ragionamenti, enumerando «almeno sette errori» fondamentali in cui anch'egli è caduto, come spesso accade a chi cerca di giustificare su basi genetiche le razze umane e reificarle come entità biologiche.

Giunge così il breve epilogo che considera la vera dimensione in cui le razze esistono, quella di costrutti sociali, e le tendenze più recenti sotto questo aspetto. Per il quale in certi paesi c'è forse qualche «motivo di cauto ottimismo, soprattutto per chi si accontenta di adottare una prospettiva a lungo termine». Ma nell'insieme non c'è troppo da rallegrarsi: «Dal punto di vista scientifico, il problema della razza possiamo considerarlo (meglio, dovremmo considerarlo) morto; tuttavia, sul fronte sociale e politico, mostra una tenacia degna di uno zombie».

Giovanni Sabato

Nuovi scenari per il cosmo

La strada aperta dalla rilevazione di onde gravitazionali

L'annuncio della prima rilevazione diretta di un'onda gravitazionale, l'11 febbraio 2016, ha aperto scenari insperati per astrofisici e cosmologi. Previste dalla teoria della relatività generale, si è dovuto attendere un secolo affinché le onde gravitazionali potessero essere rilevate direttamente grazie alle antenne delle collaborazioni LIGO (statunitense) e Virgo (europea).
Il segnale GW150914, osservato dalle due antenne di LIGO il 14 settembre 2015, era frutto della fusione di due buchi neri stellari con masse di alcune decine di masse solari ciascuno e distanti oltre un miliardo di anni luce da noi, il cui «canto del cigno» si era manifestato come un'increspatura del tessuto spazio-temporale arrivata sino al nostro pianeta alla velocità della luce. Non molto tempo dopo, un'onda gravitazionale frutto della fusione fra due stelle di neutroni ha inaugurato l'astronomia multimessaggera. L'evento è stato osservato anche in varie bande dello spettro elettromagnetico, offrendo per la prima volta un'«osservazione multisensoriale» di un fenomeno astrofisico. Partendo dal racconto di queste scoperte, Gianfranco Bertone, portavoce del GRAPPA (GRavitation, AstroParticle Physics Amsterdam) Insitute ad Amsterdam e professore dell'ateneo della stessa città olandese, descrive il nuovo contesto di grande fermento fra astrofisici, cosmologi e fisici delle particelle, rimasti per anni arenati in una serie di misurazioni ed esperimenti infruttuosi, chi alla ricerca delle particelle componenti la materia oscura, chi alla comprensione dell'origine dell'energia oscura.
L'autore racconta con entusiasmo non solo i grandi passi che ci hanno portato sin qui, ma anche gli insuccessi, gli errori e, soprattutto, le prospettive future, immediate e più a lungo termine. Con una scrittura ricca di riferimenti culturali – dalla poesia all'arte, fino alla filosofia – Bertone accompagna il lettore alla scoperta di un universo la cui spiegazione si nasconde nell'intreccio fra macrocosmo e microcosmo. Ma la sintesi fra infinitamente grande e infinitamente piccolo – i due infiniti del titolo – sembra ancora lontana.

Emiliano Ricci

Sospesi tra due infiniti
di Gianfranco Bertone
Longanesi, Milano, 2019,
pp. 192 (euro 18,00)

Il sogno delle previsioni

Un'analisi critica del determinismo e del suo fallimento

«Dobbiamo dunque considerare lo stato presente dell'universo come effetto del suo stato anteriore e come causa del suo stato futuro». Inizia così un passo di Pierre-Simon Laplace che a fine Settecento allungava sulla scienza le proprie convinzioni deterministiche. Si possono conoscere gli stati futuri di un sistema a partire dalla conoscenza delle condizioni iniziali e delle leggi delle natura. Dopo gli exploit di astronomia e fisica, complici il metodo sperimentale di Galileo e le leggi della gravità di Newton, a impedire il raggiungimento del pieno potenziale della scienza sembrava essere solo la limitata precisione della conoscenza degli stati iniziali.
La storia successiva ha dimostrato che il sogno deterministico non si è realizzato, ma per capire per quale motivo i due autori accompagnano il lettore in un'analisi di diversi tipi di previsione, in ordine crescente di difficoltà. Si parte con le più facili, le eclissi, per passare alle maree. Le cose si cominciano davvero a complicare nel livello delle previsioni meteo e del problema dei tre corpi, quando la dinamica interna del sistema è molto complessa; e si passa infine a sistemi di cui non disponiamo (forse) ancora una serie storica sufficientemente ampia per ricavarne degli analoghi (per esempio in sismologia), oppure sistemi in cui le leggi potrebbero non esistere o cambiare troppo rapidamente (come in finanza). Capire la differenza tra i diversi tipi di previsione significa comprendere perché alcune cose possono essere previste con precisione, altre con un certo grado di confidenza e altre no, o almeno non ancora.
Finestra interessante quella che si apre a metà del libro, quando nell'esposizione si affacciano i big data, che sommati a grandi capacità di calcolo hanno fatto pensare che non servisse più conoscere le leggi che governano la natura, ma che fosse sufficiente avere a disposizione tanti dati da macinare. Gli autori rispondono con il classico adagio per cui se una casa è fatta di mattoni (i dati), un mucchio di mattoni non è una casa.
Una lettura non così divulgativa, ma centrata su uno dei grandi dibattiti scientifici, e non solo, di oggi.

Marco Boscolo

Perché è difficile prevedere il futuro
di Luca Gammaitoni
e Angelo Vulpiani
Edizioni Dedalo, Bari, 2019,
pp. 152 (euro 16,50)

Una giornata in Groenlandia

Passato, presente e futuro dell'estremo nord del mondo

Si fa presto a dire ghiaccio. Un po' meno a capirne l'essenza: tra natura, spazio e laboratorio ne sono stati descritti 18 tipi, ciascuno dei quali caratterizzato da una differente struttura atomica. Chi lo sa bene è Marco Tedesco, scienziato polare della Columbia University, che da quasi vent'anni è vittima di una vera e propria infatuazione. In questo libro intitolato appunto *Ghiaccio*, scritto con la supervisione del giornalista Alberto Flores D'Arcais, Tedesco ripercorre 24 ore di una spedizione scientifica in Groenlandia avente come destinazione un grande lago glaciale.

Sarebbe tuttavia limitante ridurre il saggio a uno sterile resoconto delle procedure e delle tappe. Semmai, è un diario degli innumerevoli viaggi che si compiono mettendo piede sulla calotta artica: nello spazio come nel tempo, nell'ecologia come nell'economia, passando per la politica e la mitologia inuit. Ma soprattutto è anche un viaggio dentro sé stessi: catapultati dall'affollata frenesia urbana alla solitaria quiete delle sconfinate distese artiche, «il ghiaccio diventa la lente dei nostri pensieri, delle nostre paure, delle nostre sfide, una lente che rivela vari aspetti del nostro carattere». E così, accanto alle difficoltà e alle limitazioni quotidiane che un ambiente tanto affascinante quanto ostile impone ai ricercatori, stimolando affiatamento e spirito di adattamento, si fanno spazio le incognite legate al destino della colossale massa di ghiaccio che ricopre l'isola e l'intero Mar Glaciale Artico. Qui, la febbre planetaria aumenta a una velocità doppia che nel resto del globo.

Eppure, lungo il Circolo Polare Artico, l'incipiente catastrofe climatica fa gola a molti, perché promette formidabili opportunità commerciali. Ritiratosi il ghiaccio, sarà possibile dimezzare il tempo di navigazione tra Estremo Oriente ed Europa, nonché sfruttare i giacimenti di idrocarburi e di terre rare finora irraggiungibili. L'estrema pugnalata al cuore di «sua maestà il ghiaccio», monarca assoluto di una landa un tempo inviolata che sempre più spesso finisce inclusa nei cataloghi vacanze proposti ai turisti facoltosi.

Davide Michielin

Ghiaccio
di Marco Tedesco
con Alberto Flores D'Arcais
Il Saggiatore, Milano, 2019,
pp. 160 (euro 15,00)

Un'arena pericolosa

I rischi della disinformazione scientifica per la democrazia

A seguire il dibattito, a volte scomposto, che si è aperto in tempi recenti attorno alla frase «la scienza non è democratica», si sentiva il bisogno di qualcuno che, sul modello di John Bercow – lo *speaker* della Camera dei Comuni britannica divenuto celebre per il suo «Order!» – richiamasse all'ordine del pensare. È il compito che ha preso su di sé Mauro Dorato, che al posto dell'eloquio molto persuasivo e un po' teatrale di Bercow ha messo al servizio del dibattito pubblico l'argomentare rigoroso del filosofo della scienza.

Sono due le tesi fondamentali che Dorato si propone di difendere con questo saggio: il buon funzionamento di una democrazia richiede un livello quanto più elevato possibile di alfabetizzazione scientifica; e proprio il progredire della specializzazione delle conoscenze scientifiche rende inevitabile il ricorso a forme di democrazie rappresentative, in un'epoca in cui non mancano invece i tifosi della democrazia diretta. Questo libro si dimostra innanzitutto utile nel comprendere le molte somiglianze che caratterizzano il funzionamento delle democrazie e delle comunità scientifiche: controllabilità delle ipotesi e costruzione del consenso razionale della comunità, fallibilità della conoscenza, libertà della ricerca sono tutte caratteristiche della scienza che hanno un correlato naturale nei regimi democratici.

Ma il cuore di questo saggio affronta uno dei problemi più acuti del nostro tempo: la sfiducia nei confronti degli esperti e le conseguenze per la tenuta delle società democratiche. Qui Dorato cerca di analizzare il fenomeno della disinformazione scientifica, tra dinamiche della comunicazione digitale e responsabilità della comunità scientifica. E suggerisce una via percorribile dai cittadini per cercare un punto di equilibrio tra la necessaria delega ai rappresentanti eletti e la conservazione dell'autonomia decisionale. Certo, agire nell'arena dei dibattiti quotidiani e spesso divisivi della nostra società è un altro paio di maniche, ma impostare il dibattito sui giusti binari è una premessa fondamentale, e il libro dà un contributo importante in questo senso.

Marco Motta

Disinformazione scientifica e democrazia
di Mauro Dorato
Raffaello Cortina, Milano, 2019,
pp. 160 (euro 19,00)

Proposte per un mondo sostenibile

A BergamoScienza si discute di energie rinnovabili, impatto climatico e risorse

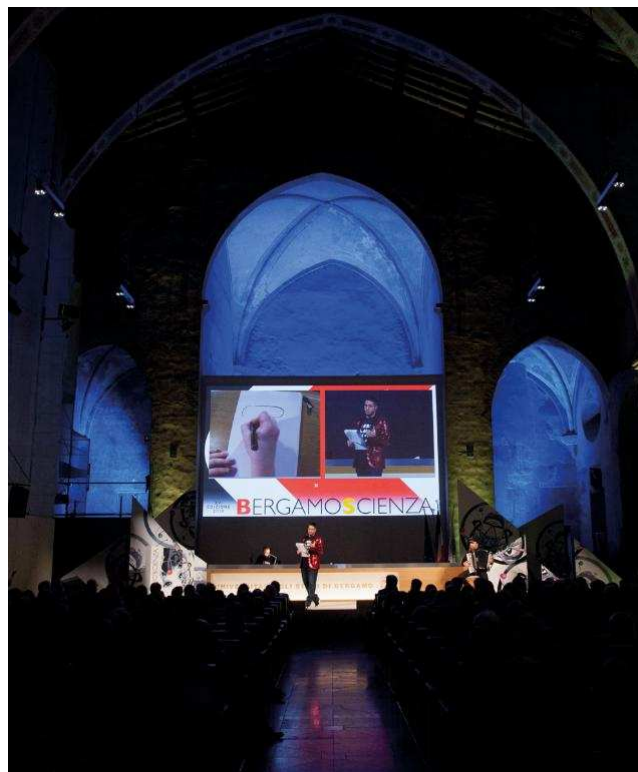
Il viaggio di Greta Thunberg verso New York ce lo ha mostrato chiaramente: scegliere di spostarsi usando solo energie da fonti rinnovabili richiede un cambiamento di paradigma. Significa che la barca a vela è più lenta dell'aereo su cui avremmo potuto imbarcarci e che dobbiamo adattarci a qualche scomodità. Ma anche che serve un grande spinta alla ricerca scientifica e tecnologica, quella che ha reso possibile la *Malizia II* su cui ha attraversato l'Atlantico, per ideare soluzioni sostenibili sul lungo periodo.

La scelta del volto dei Fridays for Future ha un valore simbolico che stimola una domanda: un mondo che funzioni al 100 per cento usando energie rinnovabili è possibile? È questo il tema principale della XVII edizione di BergamoScienza, che affronta il tema sia in termini di impatto climatico e salute dell'acqua e dell'aria, sia di alimentazione. Cercano di dare una prospettiva, tra gli altri, Mark Jacobson, direttore del programma su atmosfera ed energia del Dipartimento di ingegneria civile e ambientale della Stanford University, mentre Massimo Tavoni del Centro euro-mediterraneo sui cambiamenti climatici ha il compito di mostrare come il nostro comportamento quotidiano possa cercare di limitare il cambiamento climatico e cercare di preservare le risorse del pianeta.

Interessante approfondire anche il contributo che le agenzie spaziali stanno dando alla comprensione della trasformazione del pianeta e del clima: se ne occupa Simonetta Cheli, responsabile della direzione dei programmi di osservazione della Terra dell'Agenzia spaziale europea, assieme all'oceanografo Paolo Cipollini.

Dal vasto programma della manifestazione, che oltre alle tavole rotonde e agli incontri con gli scienziati prevede anche spettacoli e laboratori *hands on*, segnaliamo, per il tradizionale appuntamento con i premi Nobel, l'incontro con Barry Sharpless, il padre della *click-chemistry* che permette di sintetizzare sostanze complesse rapidamente e con un ridotto inquinamento ambientale. Altro incontro da sottolineare è quello che vede protagoniste la biologa Elisabetta Dejana, la storica della scienza Paola Govoni, la neuropsicologa Tiziana Metitieri e la dodicenne Ariel Spini Bauer, autrice di un libro di interviste a dieci personalità di spicco. Il tema è di attualità: il numero troppo basso di donne, soprattutto nelle posizioni di vertice, nel mondo della ricerca.

Marco Boscolo

Una festa per tutti. Il festival BergamoScienza coinvolge la città e la sua provincia con eventi, spettacoli e laboratori pensati per grandi e piccoli.

Laura Pietra (2); cortesia BergamoScienza (*logo*)

Prossimo numero

a novembre

Numero speciale

Verità, bugie e incertezza

Nell'era delle fake news, o della post-verità, chiamatela come vi pare, un numero speciale in cui cerchiamo di esplorare come sia possibile che viviamo tutti nello stesso mondo ma vediamo la realtà in modi così diversi.
La scienza fa luce sulle radici di questo fenomeno, che coinvolge ogni aspetto della nostra vita quotidiana, tanto che persino in fisica e in matematica la verità non è sempre così lampante. E sempre più prove raccolte dalle neuroscienze indicano che le nostre percezioni non sono rappresentazioni fedeli del mondo esterno: il nostro cervello – unico per ognuno di noi – fa ipotesi sulla realtà in base ai segnali sensoriali che riceve.
Ma non c'è dubbio che devono esserci fattori specifici di questa nostra era che stanno esasperando la perdita di punti di riferimento comuni. L'incertezza ci rende più suscettibili alle manipolazioni. Perciò, capire come ci rapportiamo istintivamente con l'ignoto può aiutarci a risolvere le sfide più complesse del nostro tempo.

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Andrea Mattone (*grafico*), Cinzia Sgheri, Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione:
Andrea Lignani Marchesani
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano,
telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati
Il responsabile del trattamento dei dati raccolti in banche dati di uso redazionale è il direttore responsabile a cui è possibile rivolgersi scrivendo a privacy@lescienze.it per i diritti previsti dal Regolamento (UE) 2016/679 sulla protezione dei dati personali.

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - settembre 2019

ISSN 2499-0590

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief and Senior Vice President
Mariette DiChristina

President
Dean Sanderson

Executive Vice President
Michael Florek

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Francesca Bernardis: *Idee pazzesche, in senso buono*; Silvio Ferraresi: *Come la materia diventa mente*; Eva Filoramo: *Definire i confini, Un territorio che cambia, Uno scontro inevitabile?, Promesse infrante*; Alfredo Tutino: *Ambizioni artiche, Condividere o conquistare, Una nuova realtà, Benvenuti al nord.*

ABBONAMENTI E ARRETRATI
GEDI Distribuzione S.p.A.

Per informazioni sulla sottoscrizione di abbonamenti e sulla richiesta di arretrati telefonare al numero 0864.256266 o scrivere a abbonamenti@gedidistribuzione.it o arretrati@gedidistribuzione.it
Fax 02.26681986.

Italia	
abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00
Estero	
abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

Accertamento diffusione stampa certificato n. 8593 del 18/12/2018

Illustrazione di Red Nose Studio